

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

Nedestruktivní zkoušení svarových spojů

Non-Destructive Testing of Welds

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

Jiří Mihula

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Mihula**

Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911R028 Diagnostika materiálů

Téma: **Nedestruktivní zkoušení svarových spojů**
Non-Destructive Testing of Welds

Zásady pro vypracování:

Teoretická část:

- Kontrola svarových spojů, destruktivní zkoušky, metodika NDT zkoušení
- Charakteristika vybraných způsobů NDT zkoušení, výhody, nevýhody, atd.
- Progresivní metody NDT testování, metoda IRIS
- Možné vady a jejich příčiny, případně statistika výskytu vad u tlakových nádob

Experimentální část:

- Využití popsané NDT metodiky v praxi, praktické zkoušení konkrétního výrobku (částí tlakových nádob)
- Diskuze získaných poznatků, zhodnocení výsledků

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOPEC, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, s.r.o. Brno, 2008
- [2] Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel alloys. EN ISO 15614-1:2004. 2004.
- [3] REGAZZO, r., REGAZZO, M.: Ultrazvuk - Základy ultrazvukové defektoskopie, Technická literatura BEN, Praha 2013, ISBN 978-80-7300-466-8.
- [4] KREIDL, M. a kol.: Diagnostické systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, ISBN 80-01-02349-4

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Kraus, Ph.D.**

Datum zadání: 29.11.2013

Datum odevzdání: 23.05.2014

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry. Měl by korespondovat s podobou vnějších desek (viz část III) doplněnou o název práce, umístěný nad spojením *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení je napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a je vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listu vloženo prohlášení spolupracující právníké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. jedné strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý

– 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listu. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2013/2014. Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru.

Ostrava 22. 11. 2013

Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 19.5.2014

..... *Jiří Ambula*
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt:

Tato práce se zabývá nedestructivními zkouškami (NDT) svarových spojů. Popisuje jak základní metody zkoušení jako jsou vizuální metoda, kapilární metoda, magnetická metoda prášková, metoda prozařování, ultrazvuková metoda, tak i některé speciální metody jako jsou zkoušení akustickou emisí, vířivé proudy, zkoušení těsnosti, metodu sfázovaných ultrazvukových senzorů (phased array) a metodu IRIS (Internal rotary inspection systems). Prakticky prokazuje vhodnost k detekci určitých vad na chladiči kondenzátoru. Nestructivními zkouškami stanovuje zbytkovou životnost chladiče kondenzátoru, který poskytuje velmi důležitou provozní flexibilitu jednotky FCC (jednotka fluidního katalytického krakování).

Klíčová slova:

chladič kondenzátoru, nedestructivní zkoušení, IRIS, životnost, degradace.

Abstract :

This thesis deals with non-destructive tests (NDT) of welded joints. It describes basic test methods such as visual testing, penetrant testing, magnetic particle testing, radiographic testing, ultrasonic testing, as well as some special methods like acoustic emission testing, eddy current testing, leakage testing, a method of phased array and the method IRIS (Internal rotary inspection systems). It practically shows suitability for detecting certain defects in the condenser cooler. By non-destructive testing, it determines the residual life of the condenser cooler, which provides very important operational flexibility unit FCC (fluid catalytic cracking unit).

Keywords:

condenser cooler, non-destructive test, IRIS, working life, degradation.

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Martinu Krausovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při zpracování této bakalářské práce. Zároveň bych chtěl poděkovat zainteresovaným osobám z firmy K-Protos a.s. za cenné informace, připomínky a čas, který mi věnovali při jejím zpracování. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu a pochopení.

1 Úvod	3
2 Teorie provádění zkoušek.....	4
2.1 Kontrola svarových spojů.....	4
2.2 Destruktivní zkoušení	4
2.2.1 Příčná zkouška tahem	4
2.2.2 Zkouška lámavosti.....	4
2.2.3 Zkouška rázem v ohybu.....	5
2.2.4 Zkoušky tvrdosti	5
2.2.5 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů.....	6
2.3 Nedestruktivní zkoušení	6
2.3.1 Vizuální metoda – VT (Visual Testing)	7
2.3.2 Kapilární metoda – PT (Penetrant Testing).....	8
2.3.3 Magnetická metoda prášková – MT (Magnetic Particle Testing)	10
2.3.4 Metoda prozařování – RT (Radiographic Testing).....	11
2.3.4.1 Zdroje ionizujícího záření.....	12
2.3.4.2 Detektory záření	13
2.3.4.3 Výsledek zkoušky.....	13
2.3.5 Ultrazvuková metoda – UT (Ultrasonic Testing)	14
2.4 Speciální metody nedestruktivního zkoušení	16
2.4.1 Zkoušení akustickou emisí - AT.....	16
2.4.1.1 Fyzikální princip akustické emise	17
2.4.2 Vířivé proudy – ET (Eddy Current Testing)	17
2.4.3 Zkoušení těsnosti – LT (Leakage Testing).....	18
2.4.4 Metoda Phased Array	19
2.4.5 Metoda IRIS	21

3 Praktická část	24
3.1 Popis chladiče katalyzátoru	24
3.1.1 Provozní parametry chladiče katalyzátoru a materiály.....	26
3.2 Tlaková zkouška před rozebráním aparátu.	26
3.3 Vizuální zkouška	27
3.4 Penetrační zkouška	28
3.5 Ultrazvuková zkouška	31
3.6 Rentgenová zkouška	32
3.7 Nedestruktivní kontrola teplosměnných trubek.....	33
4 Závěr.....	46
Citovaná literatura	52

1. Úvod

Cílem této práce je popsání metod NDT (nedestruktivního zkoušení materiálů) při kontrole svarových spojů tlakových nádob. Tyto zkoušky jsou důležité při získávání informací o sledovaném zařízení, určování jeho odhadované zbytkové životnosti a rizik spojených s dalším provozováním. Jde zejména o zařízení vyskytující se v petrochemickém průmyslu. V tomto prostředí je materiál silně zatěžován jak chemickými a tepelnými vlivy, tak i vysokými provozními tlaky. To způsobuje výraznou degradaci materiálu, a proto je potřeba takto exponovaná zařízení kontrolovat a zkoušet.

V této práci jsme se zaměřili na diagnostiku chladiče katalyzátoru, který byl na expozici v nepřetržitém provozu 8 let. Byla požadována NDT kontrola, která měla být provedena tak, aby byl jednoznačně prokázán stav zařízení a určena zbytková životnost. Požadovaná zbytková životnost je min. 10 let to znamená, že po tuto dobu nesmí dojít k netěsnosti aparátu a průniku páry do prostoru katalyzátoru. NDT u takto velkých a důležitých aparátů se provádí vždy při odstávkách provozního zařízení (většinou v 4letých cyklech), aby byla zajištěna bezpečnost provozu, ale i proto, že odstavení provozu v důsledku nevyhovujícího aparátu, by bylo velkou ekonomickou ztrátou.

Práce je tematicky členěna do dvou základních kapitol. První část je věnována teoretickému rozboru jednotlivých nedestruktivních metod. Jsou zde popsány jak základní metody zkoušení jako jsou vizuální metoda, kapilární metoda, magnetická metoda prášková, metoda prozařování, ultrazvuková metoda, tak i některé speciální metody jako jsou zkoušení akustickou emisí, vířivé proudy, zkoušení těsnosti, metodu sfázovaných ultrazvukových senzorů (phased array) a metodu IRIS (Internal rotary inspection systems).

V praktické části jsou provedeny nedestruktivní kontroly, které by měly prokázat životnost chladiče katalyzátoru. Důraz je zde kladen zejména na novou nedestruktivní metodu IRIS, kterou byly testovány teplosměnné trubky chladiče katalyzátoru.

Výsledky provedených zkoušek jsou pak stručně shrnuty v závěrečné čtvrté kapitole.

2. Teorie provádění zkoušek

2.1 Kontrola svarových spojů

U svarových spojů nesmí součinitel hodnoty spoje překročit následující hodnoty:

- u zařízení podrobených destruktivním a nedestruktivním zkouškám, které potvrzují, že celá skupina svarů nevykazuje žádné významné vady: 1,
- u zařízení podrobovaných namátkovým nedestruktivním zkouškám: 0,85,
- u zařízení, která nejsou podrobována nedestruktivním zkouškám (s výjimkou vizuální kontroly): 0,7.

Tam, kde to připadá v úvahu, je nutné vzít v úvahu též druh napětí, jakož i mechanické a technologické vlastnosti spoje. [1]

2.2 Destruktivní zkoušení

2.2.1 Příčná zkouška tahem

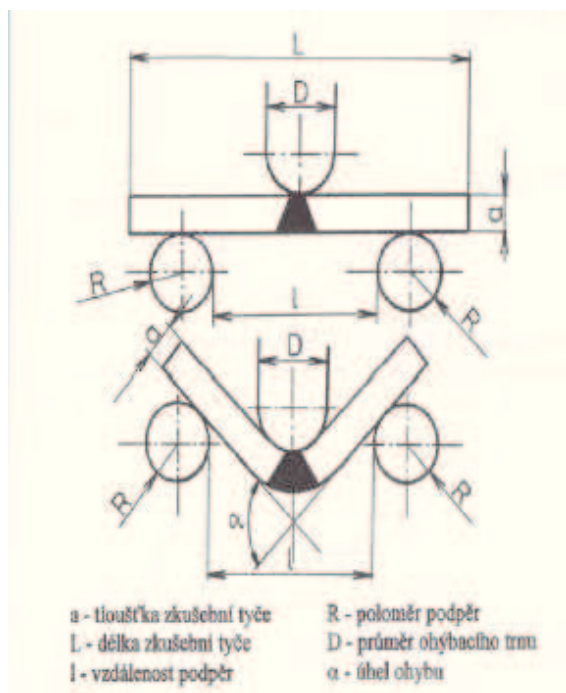
Zkouška jednoosým tahem je základní mechanická zkouška. Zkušební tyče a zkoušení pro příčnou zkoušku tahem tupých spojů musí být provedeny podle EN 895. [2] Zkušební tyč, odebraná napříč svarového spoje, je plynule zatěžovaná až do přetržení. Pokud není stanoveno jinak, provádí se zkouška při teplotě okolí (23 ± 5 °C). [3]

Pevnost v tahu zkušební tyče nesmí být nižší, než je odpovídající minimální předepsaná hodnota pevnosti v tahu základního materiálu. Pokud to nebylo před začátkem zkoušení předepsáno jinak. [2]

2.2.2 Zkouška lámavosti

Zkušební vzorky a zkoušení při zkoušce lámavosti tupých spojů musí být podle EN 910 [2]

Podstatou zkoušky je ohybová deformace. Viz obr. č. 1. Zkoušejí se dvě zkušební tělesa zatěžováním ze strany kořene svaru a dvě zkušební tělesa ze strany líce svaru. Průměr ohýbacího trnu nebo vnitřních válečků musí být $4 \times t$ a musí být dosažen úhel ohybu 120° . V průběhu zkoušení nesmí zkušební kus vykazovat žádné samostatné vady větší než 3mm v jakémkoliv směru. [4]



Obr. 1 - Zkouška lánavosti [4]

2.2.3 Zkouška rázem v ohybu

Umístění zkušebních tyčí a teplota zkoušení pro zkoušku rázem v ohybu musí být provedeny podle normy ČSN EN ISO 9016. [3]

Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva (Charpyho kladivo) přičemž zkušební tyč má uprostřed normalizovaný vrub a je podepřena na obou koncích. Nárazová práce se stanovuje v joulech a je měřítkem odolnosti materiálu proti nárazovému namáhání. Podle ní se stanovuje hodnota vrubové houževnatosti. [4]

2.2.4 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky se provádějí za účelem stanovení nejvyšší a nejnížší hodnoty tvrdosti jak základního, tak svarového kovu.

Nejčastěji používané zkoušky:

- Podle Brinella (HBW – kulička z tvrdokovu).
- Podle Rockwella.
- Podle Vickerse.
- Kladívko Poldi.

2.2.5 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů.

Účelem makroskopické kontroly je stanovení makroskopického charakteru svarového spoje, obvykle prohlídkou příčného řezu zkušebního vzorku. Kontrola se obvykle provádí na vzorcích, orientovaných příčně k ose svaru (příčný řez), které zahrnují svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast (TOO) na obou stranách svaru. Řezné plochy se obrousí a vyleští, takto připravený povrch se naleptá, osvítí a pozoruje při různém zvětšení. Kontroluje se tak struktura materiálu vřezu, který je kolmý na povrch svaru. [4]

Makroskopická kontrola se liší od mikroskopické kontroly tím, že prohlídka vzorku se děje pouhým okem nebo při malém zvětšení v naleptaném nebo nenaleptaném stavu, zjišťují se vady typu studených spojů nebo vměstků, dále spojení jednotlivých svarových housenek a rozsah TOO. [4]

Mikroskopická kontrola se provádí pod mikroskopem (50 – 500 násobné zvětšení) - lze tak pozorovat jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn, strukturní složky materiálu svaru a TOO.

2.3 Nedestruktivní zkoušení

Při kontrole svarových spojů zaujímají nedestruktivní zkoušky význačné místo. Důležité jsou tyto zkoušky při zjišťování provozní spolehlivosti zařízení, kdy během provozu mohou vznikat skryté vady. Periodické kontroly mají za úkol zabezpečit nezávadnou funkci kontrolovaného zařízení. [5]

Důležité je správné použití vhodné metody. Žádná nedestruktivní metoda není schopna zjistit úplně všechny vady. Každá metoda má omezení z hlediska zjistitelnosti minimální velikosti vady, jejího druhu, polohy a orientace. Pro správnou kontrolu daného výrobku je třeba brát v úvahu možný charakter vad, místo jejich výskytu a možnosti nedestruktivních zkoušek. [5]

Základní nedestruktivní metody používané pro kontrolu dělíme podle toho, zda identifikujeme vady na povrchu nebo uvnitř svaru.

Pro zjišťování povrchových vad:

- Vizuální metoda – VT.
- Kapilární metoda – PT.
- Magnetická metoda prášková – MT.

Pro zjišťování objemových vad:

- Ultrazvuková metoda – UT.
- Prozařovací metoda – RT.

Speciální metody nedestruktivního zkoušení:

- Zkoušení těsností – LT.
- Vířivé proudy – ET.
- Zkoušení akustickou emisí – AT.
- Metoda Phased Array.
- Metoda IRIS.

2.3.1 Vizuální metoda – VT (Visual Testing)

Vizuální metoda je nejrozšířenější metodou z metod nedestruktivního zkoušení materiálu (NDT). Metoda je zaměřená na zjišťování a hodnocení stavu (vlastností) povrchů výrobků či součástí pouhým okem, nebo pomocí speciálních přístrojů či zařízení. Metoda VT je využívána při klasické NDT kontrole, kdy hledáme vady jako třeba trhliny, zápaly, povrchové póry, dále zjišťujeme tvarové odchylky - měříme a hodnotíme lineární přesazení, převýšení kořene svaru, přesazení forem u odlitku, dále kontrolujeme stav povrchu. Jedná se o NDT metodu, která je plnohodnotná ve srovnání s ostatními NDT metodami (např. RT, PT,.) a ve svém rozsahu dokonce překračuje rámec použití ostatních NDT metod, je považována za základní NDT metodou, která by měla být provedena před každou další NDT metodou. [6]

Vizuální hodnocení svarových spojů na tlakových nádobách dle ČSN EN 13445 (jedná se o normu, která je harmonizovaná se směrnici pro tlakové nádoby PED 97/23EC). Musí být prováděno personálem, který je certifikován dle EN ISO 9712:2012. Vizuální kontrola svarů se provede dle ČSN EN 17 637, vyhodnocení přípustnosti indikací se použijí při vizuální zkoušce kritéria v ČSN EN ISO 5817. [7]

Vizuální kontrola je prováděna na připraveném (očištěném, odmaštěném a vysušeném) zkoušeném povrchu součásti. Jakost této přípravy v důsledku ovlivňuje dosažitelnou citlivost zkoušky - identifikovatelnost vad. [7]

Úspěšnost zkoušky je závislá na splnění základních tří atributů - těmito jsou:

- podmínka dostatečného osvětlení zkoušeného povrchu
- zraková způsobilost pracovníka provádějícího zkoušky
- odborná způsobilost - znalosti a praktické dovednosti pracovníka provádějícího VT zkoušky [8]

Kontrola může být prováděna přímo zrakem bez pomůcek, dále s využitím základních pomůcek jako jsou zrcadla, měrky, měřidla, lupy, atd., případně pomocí endoskopů a dalších speciálních zařízení. V posledních letech se stále významněji vyskytuje požadavek na provádění vizuálních zkoušek pomocí endoskopů (boroskopů, fibroskopů, videoskopů). Typické aplikace se objevují zejména v oblasti letectví (při provozních inspekcích), v energetice (kontrola zásobníků, výměníků, potrubí), ale i při výrobě - např. svařované rámy, uzavřené profily apod. [6]

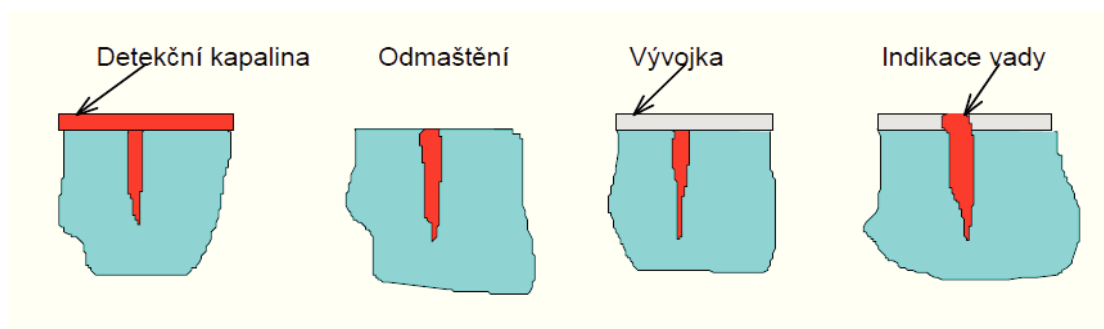
2.3.2 Kapilární metoda – PT (Penetrant Testing)

Zkoušení materiálu kapilárními metodami je jednou z nejstarších defektoskopických metod. [8]

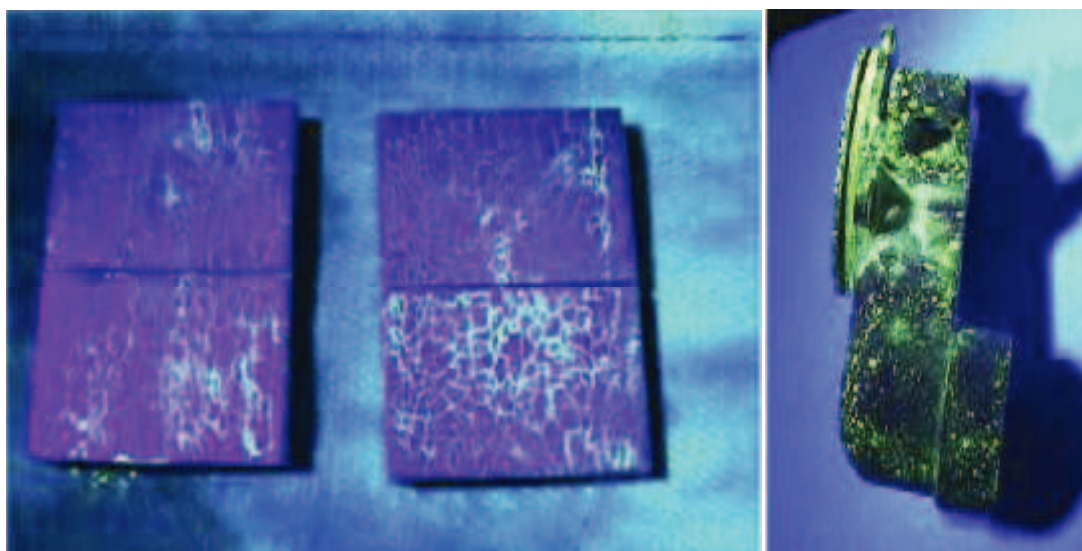
Moderní kapilární metody jsou samostatným oborem nedestruktivního zkoušení materiálu. Využívají kapilárních vlastností některých kapalin, zvaných penetranty, ke zjišťování povrchových necelistvostí materiálu, jako např. trhlin, studených spojů, porózity apod. Zjištění vnitřních vad, nemajících spojení se zkoušeným povrchem, není těmito metodami možné. Hlavní přednosti kapilárních metod spočívají v jejich principiální i aplikační jednoduchosti. Další výhodou je jejich vysoká univerzálnost, neboť tvarová složitost, rozměry i chemická složení zkoušených výrobků nehrají takovou roli jako u jiných defektoskopických metod. V neposlední řadě patří k přednostem kapilárních metod i ekonomie zkoušení, neboť zkoušky jsou provozně i investičně relativně levné, přiměřeně rychlé a při hodnocení výsledků zkoušky skrývají minimum problémů. [8]

Princip zkoušky:

- Na připravený (očistěný, odmaštěný a vysušený) zkoušený povrch součásti se nanese kapalina vhodných vlastností – penetrant.
- Po určitou dobu se ponechá tento penetrant působit - vniká do případných necelistvostí.
- Po ukončení penetračního času se přebytek penetrantu ze zkoušeného povrchu odstraní a nanese tzv. vývojka.
- Vývojka působí jako absorbent ("píják"), nasává penetrant, který vnikl do necelistvostí a zároveň vytváří kontrastní pozadí. Viz obr. č. 2
- Při následné inspekci jsou posuzovány dvojrozměrné indikace zjištěných necelistvostí. [9]



Obr. 1 - Schéma pracovního postupu kapilárních zkoušek (PT) [9]

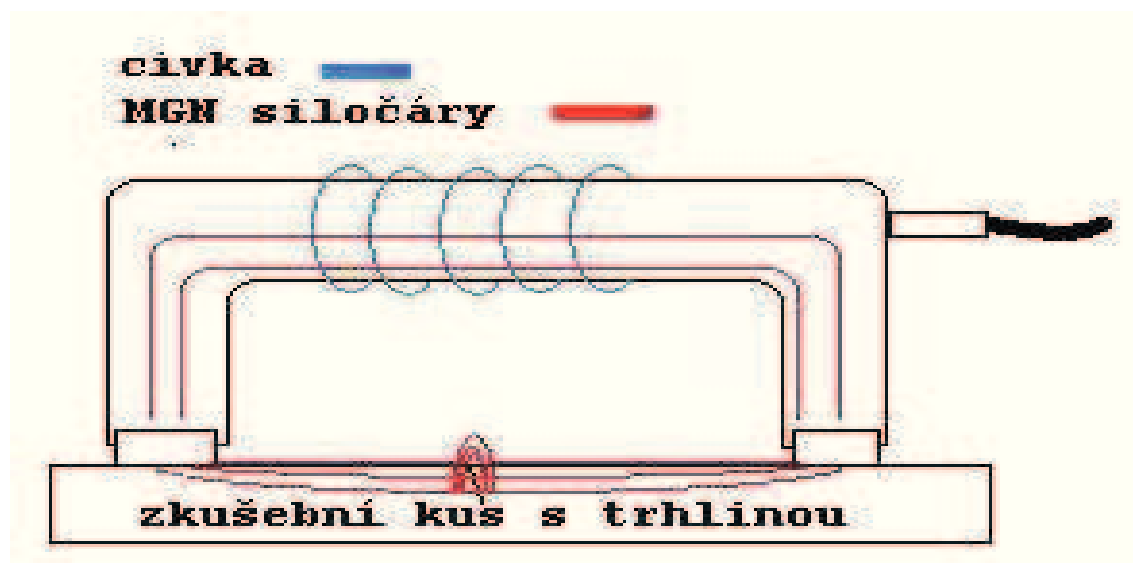


Obr. 2 - Ukázka jasového kontrastu metody PT

Tato metoda umožňuje zjistit povrchové vady, které jsou pouhým zrakem neviditelné. Indikace se hodnotí na základě vizuálního vjemu barevného nebo jasového kontrastu. Viz obr. č. 3. Detekční schopnost metody začíná při šířce vady jednotek tisíců milimetrů (v závislosti na drsnosti povrchu, druhu přítomných vad, použité citlivosti zkušebního procesu apod.) Metoda je použitelná pro téměř všechny druhy běžně využívaných materiálů (oceli, slitiny Al, Ni, Cu, Ti, sklo, keramika, plasty, atd.) Pro zkoušení povrchových vad neferomagnetických materiálů, kde nelze využít MT, je téměř nenahraditelná. Metoda se používá pro zkoušky polotovarů, při výrobě i inspekci provozovaných součástí. [10]

2.3.3 Magnetická metoda prášková – MT (Magnetic Particle Testing)

Metoda rozptylových toků také často označována jako: Magnetická metoda prášková (z angl. Magnetic Particle Inspection – MPI) je principiálně velmi jednoduchá metoda. Jestliže máme feromagnetický materiál, v němž se vyskytují povrchové (nebo v blízkosti povrchu lokalizované trhliny), pak se při zmagnetování tohoto materiálu magnetickým polem vytvoří v místě trhlín magnetický rozptylový tok, vystupující z materiálu nad jeho povrch, a tento rozptylový tok je možné indukovat buď magnetickým práškem, nebo sondami. Viz obr. č. 4. Aby magnetický rozptylový tok nad trhlinou vznikl, musí být trhlina orientovaná nejlépe do směru kolmého ke směru magnetování a magnetické pole musí mít dostatečnou intenzitu. [8] Pro jiné materiály než feromagnetické nelze MT použít.



Obr. 3 - Princip magnetické metody práškové (MT) [4]

Princip metody:

- Vhodným zmagnetováním feromagnetického materiálu dojde k jeho magnetickému nasycení.
- Případná vada v materiálu má jiné magnetické vlastnosti - většinou bývá nemagnetická (vzduch v trhlině, struska, plyn v póru).
- V místě vady dochází k deformaci magnetického pole, jeho siločáry vystupují nad povrch. Vzniká tzv. rozptylový magnetický tok, který je nositelem informace o místní změně magnetických vlastností.
- Na povrch materiálu se nanáší jemný feromagnetický prášek, jenž se magneticky přichytí na povrch, avšak pouze v místě rozptylového toku.
- Prášek na povrchu vytváří indikaci, zobrazující reliéf rozptylového toku způsobeného vadou.
- Indikace se hodnotí na základě vizuálního vjemu barevného nebo jasového kontrastu. [9]

Detekční schopnost metody začíná při šířce vady jednotek tisícín milimetru.

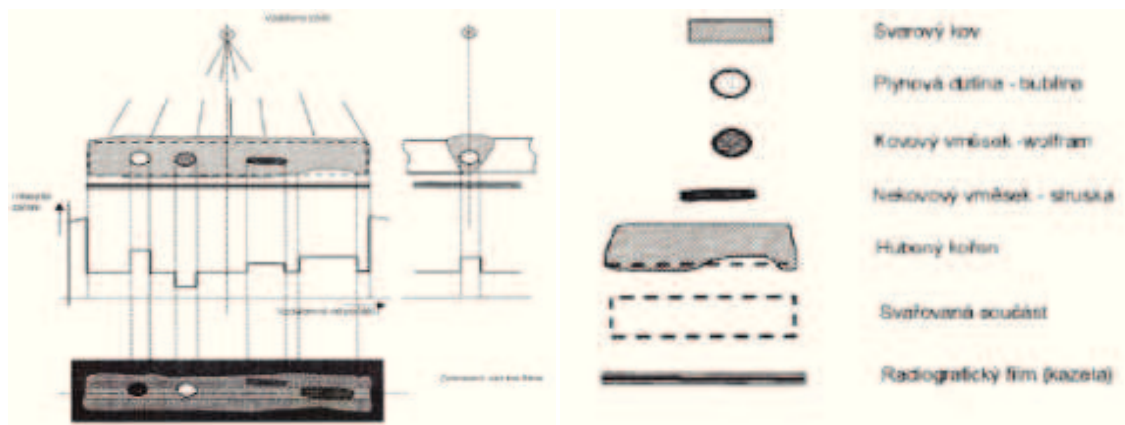
2.3.4 Metoda prozařování – RT (Radiographic Testing)

Radiografie umožňuje získat trvalý obraz vnitřních vad materiálu (zejména objemových, ale v případě vhodné směrové orientace i plošných). Obvyklé oblasti nasazení metody jsou: kontrola svarů, odlitků (i tvarově velmi složitých). Vzhledem ke své průkaznosti a trvalému záznamu je jednou z nejdůležitějších metod při kontrole zařízení s vysokou mírou nebezpečnosti (například tlakových nádob), v leteckém a petrochemickém průmyslu. [5]

Její princip spočívá v interakci ionizujícího záření s hmotou zkoušeného výrobku a v následném zviditelnění prošlého ionizujícího záření vhodným detektorem. Výsledkem interakce záření s hmotou je změna jeho primární intenzity, lze tedy zviditelnit ta místa ve výrobku, ve kterých se vyskytují nehomogenity, u kterých ke změně intenzity záření dochází v menší míře než v okolním zdravém materiálu. Viz obr. č. 5. Metoda prozařování patří mezi metody objemové, to znamená, že zjišťuje vady v celém objemu zkoušeného materiálu. Objemové vady (dutiny, vměstky) jsou dobře zjištěitelné, plošné vady (trhliny, studené spoje) jsou zjištěitelné v omezené míře, záleží na jejich orientaci vzhledem k ose svazku záření. [5]

Pro kontrolu prozařováním je třeba:

- Zdroj ionizujícího záření.
- Vhodný detektor.
- Pomůcky pro zjištění kontroly prozářením.



Obr. 4 - Princip prozařování materiálu [4]

2.3.4.1 Zdroje ionizujícího záření

Nejstarším používaným zdrojem záření je rentgenka. Je to evakuovaná, zpravidla skleněná nebo keramická trubice, obsahující katodu a anodu. Žhavená katoda slouží jako zdroj elektronů, které jsou urychlovány anodovým napětím. Po dopadu na terčík anody vzniká rentgenové záření, které má spojité spektrum (odborně jako viditelné světlo). energii záření a jeho intenzitu lze v určitém rozsahu regulovat. Rozsah energie záření v defektoskopii používaných rentgenových přístrojů je 5 – 420. [9]

Dalším zdrojem ionizujícího záření jsou gama zářiče. Ionizující záření vzniká rozpadem radioaktivních izotopů. Technické zdroje záření jsou připravovány uměle, nelze regulovat jejich energii, mají nespojité, tzv. čárové spektrum energie, záření izotopového zdroje je zcela určena prvkem, který ji vysílá. K dispozici je několik zdrojů gama záření, které se liší energií záření a dobou možného používání (poločasem rozpadu). Mezi přednosti izotopových záření patří jednoduchost zařízení, nezávislost na zdroji elektrické energie a snadná mobilita zdroje. [5]

Pro prozařování předmětů velkých tloušťek (nad 100 mm) je možno použít urychlovačů částic. V praxi se používá betatron, kde urychlení elektronů probíhá na kruhové dráze a

lineární urychlovač, kde jsou elektrony urychlovány na přímé dráze. Energie záření se pohybuje v oblasti 2 – 20MeV.

Jak rentgenové záření, tak záření gama je lidskému organismu nebezpečné. Proto při práci s těmito zdroji záření musí být dodržovány podmínky bezpečné práce, které jsou specifikovány v dokumentaci, která je předávána Státnímu úřadu jaderné bezpečnosti (SÚJB) při žádosti o povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření. [10]

2.3.4.2 Detektory záření

Při zkoušce prozářením je vystupující záření nutné vhodným detektorem zviditelnit. Jako detektor záření se používá radiografický film nebo radioskopické zařízení. [9]

Radiografický film se liší od běžného fotografického filmu složením a tloušťkou fotografické vrstvy. Filmy se vyrábějí s různou citlivostí k ionizujícímu záření, ve formátech až 30 x 40 cm. Po exponování filmu je nutné provést jeho vyvolání v temné komoře. Teprve po vyvolání a usušení filmu je možné provést jeho vyhodnocení (zjištění nalezených vad a jejich proměření). Výhodou je, že vyvolaný film poskytuje trvalý záznam o stavu zkoušeného předmětu přibližně ve velikosti 1:1. Z hlediska kvality je tento způsob detekce citlivější než radioskopie. Nevýhodou je časová prodleva mezi dobou expozice filmu a vyhodnocením radiogramu. [9]

Radioskopie využívá k detekci a zviditelnění ionizujícího zařízení technických prostředků (zesilovačů jasu rentgenového obrazu, fluorescenčních stínítek apod.) Obraz kontrolovaného předmětu je viditelný hned. Obsluha může operativně měnit podmínky prozařování (energie záření, zvětšení obrazu) a může předmětem během kontroly pohybovat. Současná radioskopie využívá možnosti televizní techniky a možností počítačového zpracování obrazu.

2.3.4.3 Výsledek zkoušky

Výsledkem kontroly prozáření je radiogram (obraz na TV monitoru). Na něm je pomocí zčernání (jasu) zviditelněn rozdíl ionizujícího záření po průchodu předmětem, způsobený buď nehomogenitou materiálu (přítomnost vady) nebo odlišnou absorpcí různých konstrukčních materiálů. Na velikost minimální zjištěné vady mají vliv především energie použitého zařízení, neostrost zobrazení vady, rozptýlené záření, kvalita detektoru, použitý způsob prozařování a podmínky pozorování při vyhodnocování. [10]

Podmínky pro dosažení kvalitního radiogramu předepisuje metodická norma ČSN EN 1435. Tato norma udává podmínky prozařování, které je nutno dodržet, aby radiogram měl odpovídající kvalitu. V případě speciálních požadavků na kontrolu, které se odklánějí od metodických norem, je nutné tyto odchylky specifikovat v dohodě mezi dodavatelem a odběratelem. [11]

Hodnocení radiogramů se provádí podle norem pro vyhodnocování radiogramů. Ty se liší podle toho, o jaký výrobek, případně materiál se jedná. Svary ocelových výrobků se hodnotí podle normy ČSN EN 12517-1. [12]

2.3.5 Ultrazvuková metoda – UT (Ultrasonic Testing)

Ultrazvuk je jednou ze základních metod nedestruktivního zkoušení. Ultrazvuková metoda umožňuje zjistit přítomnost vnitřních vad materiálu, a to i ve velké hloubce pod povrchem. UT metoda má největší dosah ze všech NDT metod. [10]

Tato zkouška je založena na principu odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí, která mají odlišné vlastnosti při šíření tohoto vlnění. Mechanické vlnění (tj. střídavé stlačování a rozpínání se) se šíří celistvým prostředím určitou rychlostí, která je závislá především na druhu prostředí a na frekvenci vlnění. Pokud se náhle změní druh prostředí, změní se náhle i poměry v šíření vlnění na rozhraní dvou různých prostředí. Říkáme, že se vlnění láme, nebo odráží. Dá se tedy říci, že je tato metoda založena na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem, jeho reakci na změny ve zkoušeném předmětu a následnou registraci. [13]

Mezi sondou a zkoušeným předmětem musí být akustická vazba, aby ultrazvuk vysílaný měničem se šířil do zkoušeného materiálu. Když uvážíme běžný rozsah jmenovitých frekvencí 1 až 5 MHz, které se většinou používají v defektoskopii, tak pro tyto frekvence ultrazvuk neprochází vzduchem. Proto musí být mezi předmětem a sondou vazební prostředek. [14]

Zdroje ultrazvukových impulsů jsou ultrazvukové zkušební sondy, jejichž základním prvkem je elektroakustický měnič. Tyto měniče mění elektrický signál na mechanický a nejčastěji se používají měniče piezoelektrické. Podle druhu vln, které sonda vysílá a přijímá, se dělí sondy na přímé a úhlové. Jako indikátor se používá obrazovka, na jejímž stínítku se zobrazují vysílané a přijímané impulsy. V okamžiku vysílání se na obrazovce objeví vysílací impuls (počáteční echo) a koncové echo. Mezi nimi jsou potom případná echa signalizující

vadu v kontrolovaném výrobku. Vzdálenost mezi počátečním a koncovým echem je přímo úměrná tloušťce základního materiálu. [14]

Nejjednodušší metodou zkoušení ultrazvukem je metoda průchodová. Na dvou protilehlých stranách diagnostikovaného tělesa se umístí vysílací a přijímací ultrazvuková sonda. Signál generátoru vysílače může být jak spojitý tak impulzní. Vyhodnocení vady spočívá ve vyhodnocení poklesu akustického tlaku. [13]

Nevýhodou průchodové metody je, že nelze lokalizovat polohu vady v materiálu. U kontaktní průchodové metody se projeví chyby měření vlivem různé akustické vazby obou sond s materiálem. Výhodou této metody je, že se neuplatní mrtvá zóna sond a je použitelná např. pro testování tenkých plechů. [13]

Nevýhodou je nemožnost odlišit, zda pokles akustického tlaku je v důsledku vady nebo nedokonalým akustickým navázáním. Další nevýhodou je, že se musí použít dvě oddělené ultrazvukové sondy, které musí být umístěny souose. [13]

Nejrozšířenější je metoda odrazová – impulsová. Je všestranně použitelná a poskytuje informace nejen o vadách, ale i o struktuře materiálu, rozměrech atd. Princip metody spočívá ve vysílání krátkého ultrazvukového impulsu, který se odráží od všech rozhraní (vad i povrchů), vrací se zpět do sondy a časový průběh je zobrazován na obrazovce. Generátor tedy vybudí ultrazvukovou sondu, která vysílá i přijímá ultrazvukové impulsy a je akusticky navázaná na zkoušené prostředí. Impulsy se odrážejí od vad a od povrchu materiálu a vracejí se zpět do sondy. Generátor je spouštěn synchronizátorem současně se zdrojem časové základny, která se přivádí na horizontální vychylovací destičky obrazovky. Na její vertikální vychylovací systém je připojen výstup zesilovače. Impulsová odrazová metoda dává informaci o vzdálenosti odrazové plochy podle zpoždění, s nímž se odražený impuls (echo) vrátí do sondy, a o velikosti odrazové plochy podle výšky echa. Výhodou této metody je možnost vysílat i přijímat jednou sondou a lze tedy kontrolovat i výrobky přístupné pouze z jedné strany. [10]

Ultrazvukem jsou dobře zjistitelné vady plošného charakteru, kdy rovina vady je přibližně kolmá na směr šíření vlnění. Obtížně jsou však zjistitelné objemové vady (bubliny, póry) a plošné vady umístěné rovnoběžně se směrem vlnění. Nelze téměř vůbec usuzovat typ vady (nelze zjistit, zda jde o bublinu, pór či trhlinu), je možné pouze určit, že se jedná o nějakou vadu a přibližně určit velikost vady. Z toho je patrné, že se zjistitelnost vad u zkoušky

prozařováním a ultrazvukem dobře doplňuje. Proto se často tyto dvě metody kombinují. Výhodou ultrazvuku je téměř okamžitý výsledek zkoušky, nižší cena zkušebního zařízení, než u prozařování a snadné zkoušení větších tloušťek. Vzhledem k charakteru metody, ji můžeme také používat k měření tloušťek, případně ke zjišťování úbytku tloušťky. Nejsou také potřeba žádná zvláštní a nákladná bezpečnostní opatření, jako u prozařování. Pracovník kontroly musí být velmi zkušený, aby výsledky byly hodnověrné. Nevýhodou je obtížné, až nemožné rozpoznání druhu vady a výsledky nejsou zpravidla dokumentovány (neexistuje trvalý záznam obrazu vad).

2.4 Speciální metody nedestruktivního zkoušení

2.4.1 Zkoušení akustickou emisí - AT

Akustická emise je fyzikální jev doprovázející deformační, lomové, případně fázové přeměny v materiálu při jeho dynamickém namáhání. Tyto přeměny emitují elastické vlnění, které lze detekovat a využít jako diagnostický signál. Jedná se tedy o nedestruktivní pasivní diagnostickou metodu, která neovlivňuje měřený objekt a podává integrální informace o momentálním dynamickém stavu jeho materiálu. Je vhodná například pro monitorování únavových procesů tlakových zařízení, detekci materiálových vad vznikajících během provozu, detekci mikrotrhlin a jejich šíření. V přeneseném smyslu se pojmem akustická emise rozumí diagnostická metoda, založená na využití tohoto jevu. [5]

Metoda akustické emise patří mezi novější metody nedestruktivního zkoušení. Používá se pro detekci vzniku defektů v tlakových nádobách a potrubních systémech. Elastické vlnění, uvolněné ze zdroje emisního signálu (např. vady), se detekuje pomocí piezoelektrických snímačů a vzniklé impulsy se dále zpracovávají a vyhodnocují ve vlastním měřicím zařízení. Obtíže mohou způsobovat různé druhy šumů, které mohou interferovat se signálem užitečným. Tyto rušivé signály je nutné odstranit. [5]

Hlavní výhodou metody je, že se kontroluje současně celé zařízení, zpravidla během výrobní nebo periodické tlakové zkoušky a detekují se pouze (aktivní) vady, které by mohly ohrozit další provoz. Metodou akustické emise však nelze spolehlivě určit druh a velikost vady, zjištěné a lokalizované emisní zdroje se proto ověřují klasickými nedestruktivními metodami.

U potrubních systémů se metoda akustické emise uplatňuje rovněž pro detekci netěsností, protože únik média je intenzivním zdrojem emisních signálů. [8]

2.4.1.1 Fyzikální princip akustické emise

K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie vlivem působení vnitřních nebo vnějších sil. Akustická emise je vyvolána nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálů, kavitačními procesy, turbulencemi při úniku kapaliny nebo plynu, degradací dielektrika. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impuls, šířící se materiálem jako elastická napěťová vlna. Na povrchu materiálu se vlna částečně odrazí a dále se šíří převážně jako povrchová a lze ji detekovat vhodným senzorem, přiloženým k povrchu a převést na elektrický signál. [5]

Při vzniku časově oddělených emisních událostí vzniká nespojitá akustická emise v podobě jednotlivých časově oddělených impulsů, které mají obvykle charakter tlumených kmitů. Trvání impulsu bývá od několika nanosekund do několika milisekund. Typickým zdrojem nespojitě akustické emise je aktivní, tj. měnící se trhlina.

Při časově neoddělených emisních událostech vzniká spojitá akustická emise v podobě trvalého, vlivem interferencí zkresleného signálu, který má tedy náhodný charakter. Typickým zdrojem spojitě akustické emise je kavitace, plastická deformace povrchů při tření, únik kapalin nebo plynů. Kromě zjištění samotného výskytu akustické emise, tedy existence jejích zdrojů v zařízení, je nutná lokalizace emisního zdroje. [15]

V případě objektů, které mají převažující jeden rozměr, např. potrubí nebo obvodový svár, lze použít k lokalizaci emisního zdroje dvou senzorů, předpokladem je znalost rychlosti šíření povrchové akustické vlny. Ta se může zjistit kalibrací, uměle vyvolaným impulsem.

V případě objektů, které mají převažující dva rozměry, např. desky nebo pláště tlakových nádob, lze použít k lokalizaci emisního zdroje plošně rozmístěných senzorů, minimálně tří. [5]

2.4.2 Vířivé proudy – ET (Eddy Current Testing)

Metoda vířivých proudů se používá pro zkoušení elektricky vodivých materiálů a má různé oblasti použití. Nejčastěji se používá při kontrole hutních polotovarů, při provozních kontrolách trubkových tepelných výměníků, dále v letectví a automobilovém průmyslu. [5]

Metoda patří mezi tzv. povrchové metody: To znamená, že je nejčastěji používána k hledání povrchových vad. Lze však hledat také vady v určité hloubce pod povrchem, měřit tloušťku nevodivých povlaků, nebo třídit materiály na základě chemického složení nebo tepelného zpracování. [16]

Princip metody:

- Snímač je obvykle složen ze dvou cívkových systémů - budícího a snímacího.
- Budící (primární) cívkou prochází proud o vysoké frekvenci (používané frekvence se pohybují v řádech kHz až MHz). V okolí budící cívky vzniká střídavé magnetické pole (primární), které vyvolá ve zkoušeném materiálu tok tzv. vířivých proudů.
- Tyto vířivé proudy způsobí vznik tzv. sekundárního magnetického pole, které působí proti poli primárnímu.
- Magnetické pole způsobené střídavým proudem v budící cívce i magnetické pole způsobené vířivými proudy působí na měřicí cívkový systém a v měřicím cívkovém systému se indukují napětí.
- Pokud se změní vlastnosti zkoušeného předmětu (změna materiálu, výskyt vady atd.), nebo se změní vzdálenost snímače od zkoušeného povrchu, změní se i napětí v měřicím cívkovém systému (změna impedance cívky).
- Tato změna představuje indikaci, která je dále zpracovávána, vyhodnocována. [5]

2.4.3 Zkoušení těsnosti – LT (Leakage Testing)

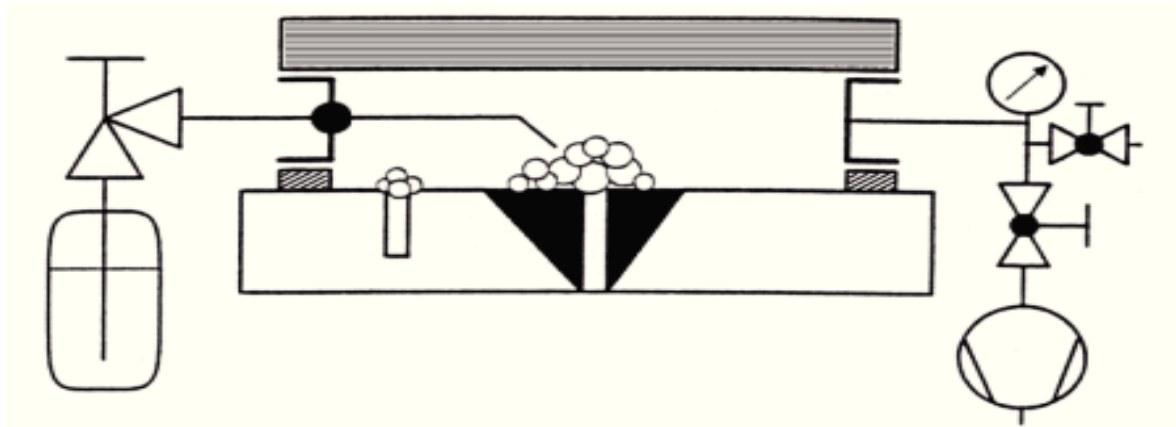
Zkoušení netěsností je zaměřeno na zjišťování nedokonalostí pevného rozhraní, které umožňuje za tlakového spádu mezi dvěma povrchy průnik tekutin. Obecně lze detekovat vady materiálu (vzniklé nedokonalostí metalurgického, či technologického procesu nebo za provozu), mechanických spojů a nerozebíratelných spojů (svary, lepené a pájené spoje).

Velikost netěsnosti je pak dána mírou objemu látek proniklých vadou za jednotku času. V zásadě se rozlišují dva základní typy zkoušek - integrální (pro určení celkové hodnoty velikosti netěsnosti) a lokalizační (zaměřené na určení polohy netěsnosti). [17]

Zkušební metody/techniky:

- Metoda změny tlaku (pokles/vzrůst tlaku, přetlakem kapaliny, plynu).
- Bublínková metoda (přetlaková, podtlaková s vakuovou komůrkou). Viz obr. č. 6.

- Kapilární metoda (průsak penetrantu skrze zkoušený objekt).
- Heliová metoda (zkušebním plynem - He, provedení - přetlaková, vakuová).
- A další (snímání ultrazvuku).



Obr. 5 - Bublinková metoda podtlaková. [17]

Volba vhodné metody a techniky zkoušení závisí na požadované citlivosti zkoušky, na charakteru zkoušeného dílce (tvar, jeho konstrukce, velikost (objem)), na legislativních požadavcích, požadavcích zákazníka.

Metodické požadavky na LT zkoušku jsou - předepisují normy, kódy, předpisy a požadavky zákazníka. [17]

2.4.4 Metoda Phased Array

Základní koncepce skupinového měniče (Phased Array)

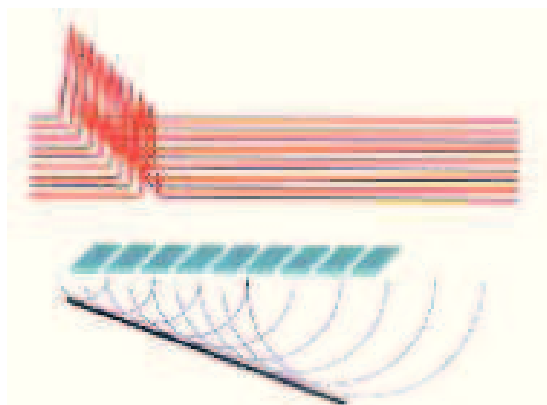
Phased Array je skupinový měnič - sonda s řadou jednotlivých měničových elementů v jednom pouzdře. Těchto elementů je obvykle 128 a každý element je řízen vlastním vysílačem a přijímačem. Základem pro měniče jsou kompozitní materiály. Pro vytvoření ultrazvukového svazku, obvyklého standardní sondě je současně napájeno cca 8-16 elementů. Základem pro zajištění dále uvedených možností je fázové řízení jednotlivých elementů skupinového měniče. [18]

Pomocí fázově řízených jednotlivých elementů je např. možné:

- naklápění svazku.
- fokusace svazku.

Naklápění svazku:

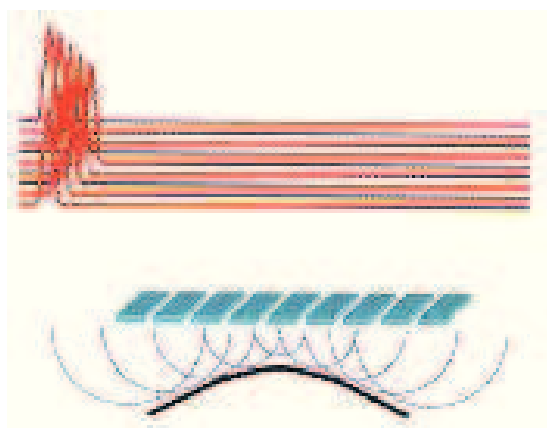
V případě, že je převeden vysílací impuls na jednotlivé elementy postupně z jednoho kraje, vytvoří vlnu, která má určitý úhel. Viz obr. č. 7. Nastavením fáze mezi jednotlivými elementy je možné elektronicky podle potřeby nastavit úhel sondy. [19]



Obr. 6 – Naklápění vlny, která má určitý úhel. [19]

Fokusace svazku:

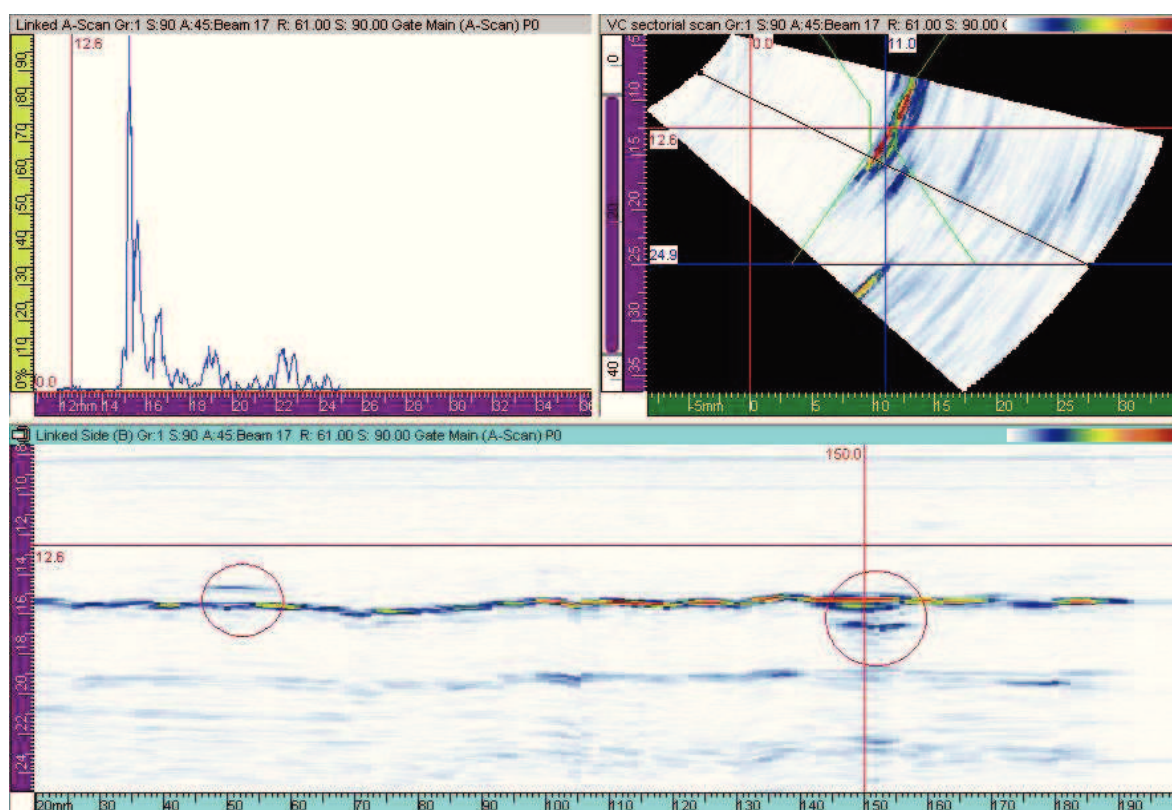
Změna délky blízkého pole, fokusace, je zajištěna tak, že do všech elementů pole není přiveden vysílací impuls současně, ale krajní elementy příslušné skupiny jsou aktivovány s fázovým předstihem. Nastavením fáze, posunu času, mezi aktivací krajních elementů vůči elementům vnitřním se nastavuje ohnisko. Tzn., je možné nejenom nastavit sondu přesně podle zkoušené úlohy, ale je možné jednou „sondou“ zkontrolovat např. podpovrchové vady na vrchním, a při druhém kroku na zadním povrchu. Toto doposud bylo možné zajistit pouze výměnou sondy, nebo více kanály. Viz obr. č. 8. [19]



Obr. 7 - Fokusace svazku. [19]

Na rozdíl od klasické techniky prozvučujeme při technice PA, celým rozsahem úhlů od 45° do 75° , a tak máme možnost porovnávat sektorové obrazy navzájem, princip umožňující v tomto případě odlišení vadných ech od tvarových ech spočívá v odlišné echo dynamice. Viz obr. č. 9 [20]

Normy předepisují u zkoušení svaru této tloušťky prozvučovat každou část průřezu svaru stejným úhlem, což se u klasické techniky dosahuje pohybem sondy od a ke svaru a u techniky PA tzv. lineárním scanem. Výhodu však v tomto případě máme právě u nestandardního přístupu, z prozvučování každé části průřezu svaru jiným úhlem, což je typické pro sektorové prozvučování. [20]



Obr. 8 - Indikace vad na svaru [20]

2.4.5 Metoda IRIS

Měření trubek pomocí vnitřní rotační ultrazvukové sondy

Při měření teplosměnných trubek výměníků se používají podle druhu materiálu a konstrukčního provedení především elektromagnetické metody jako ET a RFT či metody magnetické jako MFL. Další možnou metodou je metoda ultrazvuková – IRIS (Internal

Rotary Inspection System). Jedná se o rotační systém, kdy samotná sonda a její nosič nerotuje, rotuje však zrcátko, přes které je ultrazvukový paprsek směřován na stěnu trubky, kterou skenuje. Při zajištění pohybu trubkou a použití enkodéru je možné snímat rozvinutý obraz stěny trubky. [21]

Na obrázcích č. 10, 11 je vidět část zařízení, v trubce se nachází měřící hlavice se sondou, vně trubky se nachází motorový pohyb s enkodérem pohybu. K měření se používá systém MS5800 s patřičným softwarem, stejně jako je používáno ke kontrole výměníků metodami ET/RFT/MFL.

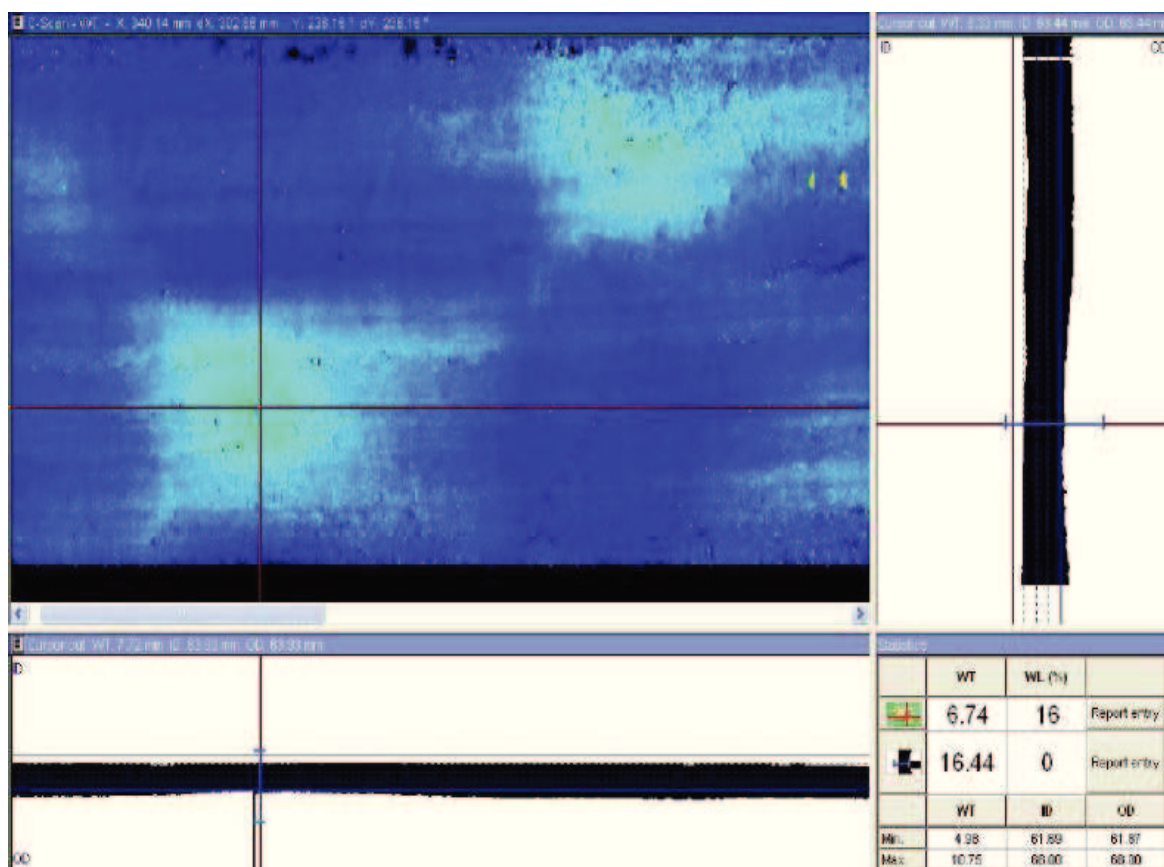


Obr. 9 - Hlavice umožňující kontrolovaný pohyb systému IRIS. [21]



Obr. 10 - Hlavice systému IRIS centrující systém v trubce. [21]

Na následujícím obrázku č. 12 je vidět záznam pořízený metodou IRIS. Barevné pole je rozvinutý plášť skenované trubky. Vpravo se potom nachází profil/průřez v místě kurzoru. Je zde jasně patrná mírná změna tloušťky stěny. [22]



Obr. 11 - Záznam stěny trubky pořízený metodou IRIS. [21]

3. Praktická část

Tato část bakalářské práce se zabývá hodnocením chladiče, který byl v nepřetržitém provozu 8 let. NDE kontrola musí být provedena tak, aby byl jednoznačně prokázán stav zařízení a určena zbytková životnost. Požadovaná zbytková životnost je 10 let. To znamená, že po tuto dobu nesmí dojít k netěsnosti aparátu a průniku páry do prostoru katalyzátoru. Viz obr. č. 13



Obr. 12 - Chladič katalyzátoru po 8 letech provozu.

3.1 Popis chladiče katalyzátoru

Chladič poskytuje velmi důležitou provozní flexibilitu FCC, umožňující přímou regulaci teploty regenerovaného katalyzátoru. Teplota regenerovaného katalyzátoru je hlavní veličina, která řídí krakovací reakce, protože stanoví poměr katalyzátor – nástřík a určuje teplotu povrchu katalyzátoru při jeho prvním kontaktu s nástříkem. Viz obr. č. 14

3.1.1 Provozní parametry chladiče katalyzátoru a materiály

Provozní parametry chladiče katalyzátoru viz tabulka č. 1

2411 - E01	Prostor pláště	Prostor trubek
Pracovní tlak	2,65 bar	48,68 bar
Hydrostatický zkušební Tlak	-	87,75 bar
Pracovní teplota uvnitř/vně	688/- °C	259/259 °C
Kapalina/Médium	FLUIDIZED CATYLYST	VODA
Objem	-	9600dm ³

Tabulka 1 – Provozní parametry chladiče katalyzátoru.

Základní materiál chladiče katalyzátoru viz tabulka č. 2

Tlaková část	Materiál
Dno komory (eliptické)	SA-516 Gr.70
Plášť komory	SA-516 Gr.70
Příruba hrdla JA	SA-350 Gr.LF2 Class1
Příruba hrdla JB	SA-350 Gr.LF2 Class1
Teplosměnné trubky 76,20x 7,94 mm	SA 213 T11/SA450
Teplosměnné trubky 34,93x 4,76 mm	SA 192 Gr.1/SA450
Materiál trubek kopí	SA-312 TP 304H

Tabulka 2 – základní materiál chladiče katalyzátoru.

3.2 Tlaková zkouška před rozebráním aparátu.

Tlaková zkouška před rozebráním se provádí pro ověření pevnosti aparátu. A je jednou ze základních zkoušek při výrobě tlakových nádob.

Průběh tlakové zkoušky aparátu na výrobní hale: Nádobu napustíme vodou a odvzdušníme. Kontrolní manometr s odvzdušněním je umístěn na nejvýše umístěné hrdlo (JB), které bylo pootočené nahoru. Po odvzdušnění je na nádobu připojena elektrická tlaková pumpa na hrdlo (JA). Navyšujeme tlak do 48,68 bar (provozní tlak), přerušíme tlakovou zkoušku k provedení vizuální kontroly aparátu. Poté navyšujeme na tlak zkušební 87,75 bar, který je zapsán v průvodní dokumentaci tlakové nádoby stabilní. Na zkušebním tlaku výdrž 30min. Po vizuální kontrole, kterou zkontrolujeme těsnost a pevnost aparátu.

Výsledek: Při tlakové zkoušce aparátu se při 76,0 bar roztrhlo těsnění mezi spodní trubkovnicí a přírubou komory pravděpodobně v důsledku, že tlaková zkouška probíhala při 20°C. Aparát do tlaku 76,0 bar nevykazoval žádné vady těsnosti ani pevnosti.

3.3 Vizuální zkouška

Kritické a rizikové části nádoby dle korozního manuálu – pro vizuální kontrolu. Do prostoru víka komory a první trubkovnice vstupuje napájecí voda. V prostoru komory se předpokládá pára. Základním problémem je elektrochemická koroze parou. Vodní pára způsobuje oxidaci nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Korozním produktem jsou oxidy železa – převážně oxid železitý, případně železatoželezitý. Koroze roste s obsahem vodní páry v médiu (s parciálním tlakem vodní páry) a její teplotou. Při teplotách do 250°C je korozní rychlost ocele velmi nízká. Z prostoru plášťové strany je předpokládán degradační mechanismus EROZE. Lokální a plošné zeslabení stěny a konstrukčních dílů.

Výsledek: Při vizuální kontrole povrchu víka, komory i hrdel nebylo nalezeno poškození vnitřního povrchu. Na základě vyhodnocení vizuální kontroly byly předepsány tyto nedestruktivní zkoušky:

- 10%RT na podélném svaru komory,
- 100%PT hrdel komory a víka
- Proměření síly stěny komory, víka a hrdel aparátu metodou UT

V případě indikací vad tyto kontroly budou provedeny v rozsahu 100%.

Výsledek: Při vizuální kontrole povrchu teplosměnných trubek 76,20x7,94 mm, materiál SA 213 T11/SA450, bylo zjištěno bodové zeslabení. Na tomto základě bylo rozhodnuto trubky vyřezat a následně proměřit metodou IRIS k určení zbytkové životnosti.

Výsledek: Při vizuální kontrole povrchu trubek kopí provzdušňovacího potrubí, materiál SA-312 TP 304H, bylo zjištěno velké bodové zeslabení u některých trubek na konci kopí. Na některých bylo možno pozorovat praskliny i díry. Viz obr. č. 15. Na základě této vizuální kontroly bylo rozhodnuto, že kopí se uříznou 300 mm od konce, vyrobí a následně navaří nová. Na potrubí se provedou tyto nedestruktivní zkoušky:

- 100% PT na všech svarech provzdušňovacího potrubí.
- Tlaková zkouška na 50,0 bar, 30 min na tlaku po navaření konců nových kopí.



Obr. 14 - Bodové zeslabení konců provzdušňovacího potrubí.

3.4 Penetrační zkouška

Penetrační zkouška provedená na 100% sváry hrdel komory (JB) a víka (JA). Při níž byl použit:

- Penetrační roztok :DIFFU-THERM
- Čistič :BRE, číslo šarže 2212
- Penetrant červený :BDR, číslo šarže 2210
- Vývojka : BEA, číslo šarže 2310

Zkouška byla provedena při teplotě 15°C, při osvětlení 510Lx, čas prolínání penetrantu 15min.

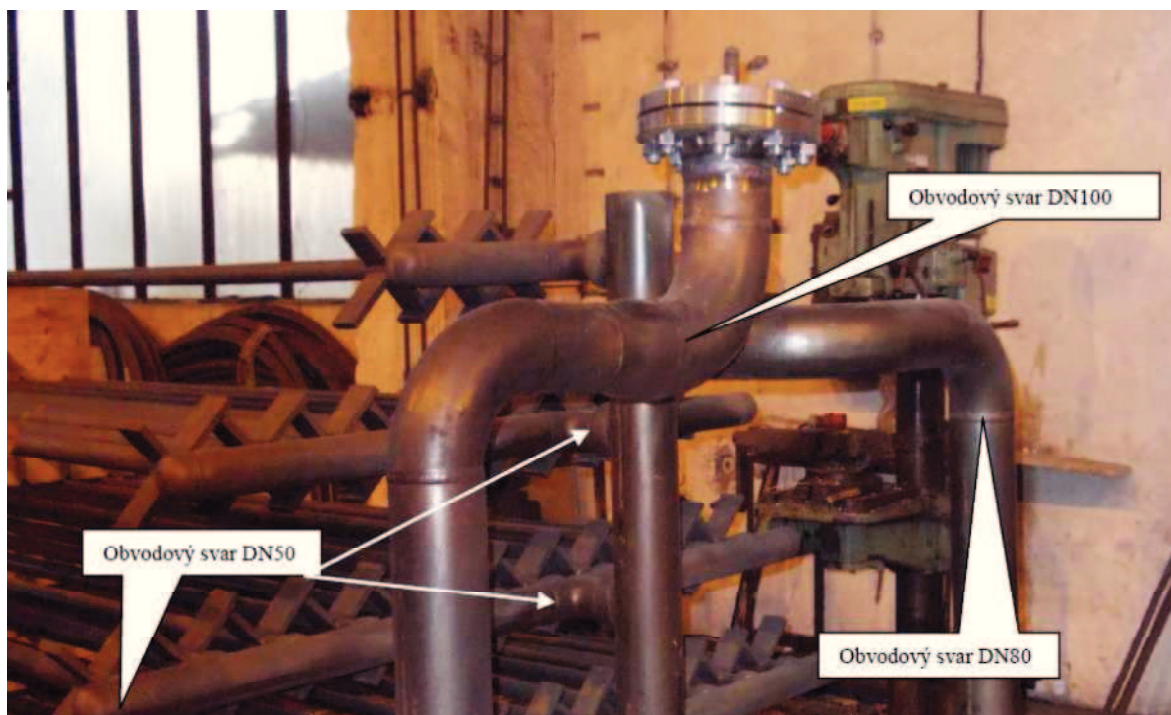
Výsledek: z vizuální a penetrační kontroly je patrné, že svarové spoje komory, víka a hrdel JA, JB jsou v pořádku a nevykazují žádné viditelné vady povrchu, tvaru, pórů ani typu trhlin a vyhovují požadavku na povrch bez těchto vad.

Penetrační zkouška provedená na 100% svarů provzdušňovacího potrubí, při níž byl použit stejný penetrační roztok, čistič, penetrant a vývojka jako u hrdel komory (JB) a víka (JA). Zkouška byla provedena při teplotě 18°C, při osvětlení 480Lx, čas prolínání penetrantu 15min.

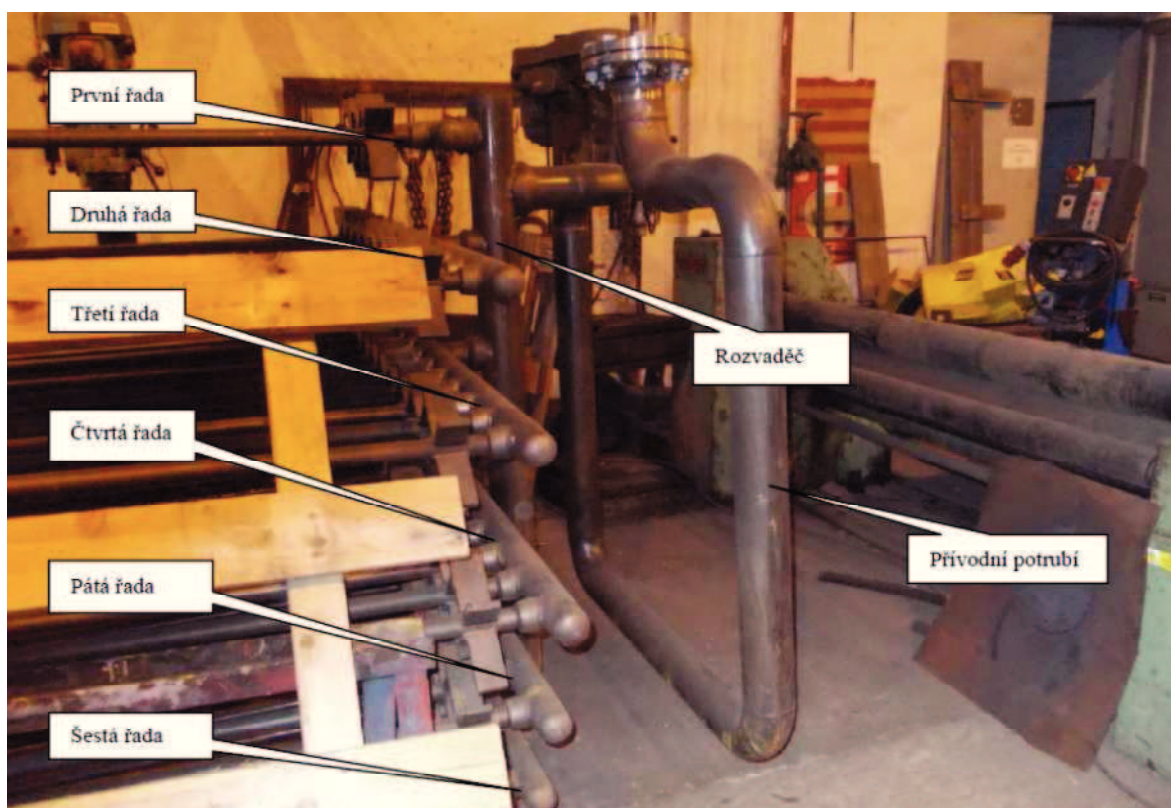
Výsledek: Z vizuální a penetrační kontroly je patrné, že svarové spoje jsou v pořádku a nevykazují žádné viditelné vady povrchu, tvaru, pórů ani typu trhlin a vyhovují požadavku na povrch bez těchto vad. Viz obr. č. 16, 17, 18 a tabulka č. 3

Číslo pozice	Velikost, druh vady	Vyhodnocení
První řada, 3 ks vlásenek, 3 koutové svary DN25, 3 koutové svary DN50, 5 obvodových svarů DN50 a 1 koutový svar DN65	Bez indikací vad	Vyhovuje
Druhá řada, 9 ks vlásenek, 9 koutových svarů DN25, koutových svarů DN50, 5 obvodových svarů DN50 a koutový svar DN65	Bez indikací vad	Vyhovuje
Třetí řada, 11 ks vlásenek, 11 koutových svarů DN25, 11 koutových svarů DN50, 5 obvodových svarů DN50 a 1 koutový svar DN65	Bez indikací vad	Vyhovuje
Čtvrtá řada, 12 ks vlásenek, 12 koutových svarů DN25, 12 koutových svarů DN50, 5 obvodových svarů DN50 a 1 koutový svar DN65	Bez indikací vad	Vyhovuje
Pátá řada, 11 ks vlásenek, 11 koutových svarů DN25, 11 koutových svarů DN50, 5 obvodových svarů DN50 a 1 koutový svar DN65	Bez indikací vad	Vyhovuje
Šestá řada, 9 ks vlásenek, 9 koutových svarů DN25, 9 koutových svarů DN50, 5 obvodových svarů DN50 a 1 koutový svar DN65	Bez indikací vad	Vyhovuje
Rozvaděč DN80 2x zaslepení, 2 koutové svary	Bez indikací vad	Vyhovuje
Přívodní potrubí DN80 redukované na DN100, 1 koutový svar DN80, 12 obvodových DN80 a 3 svary obvodové DN100	Bez indikací vad	Vyhovuje

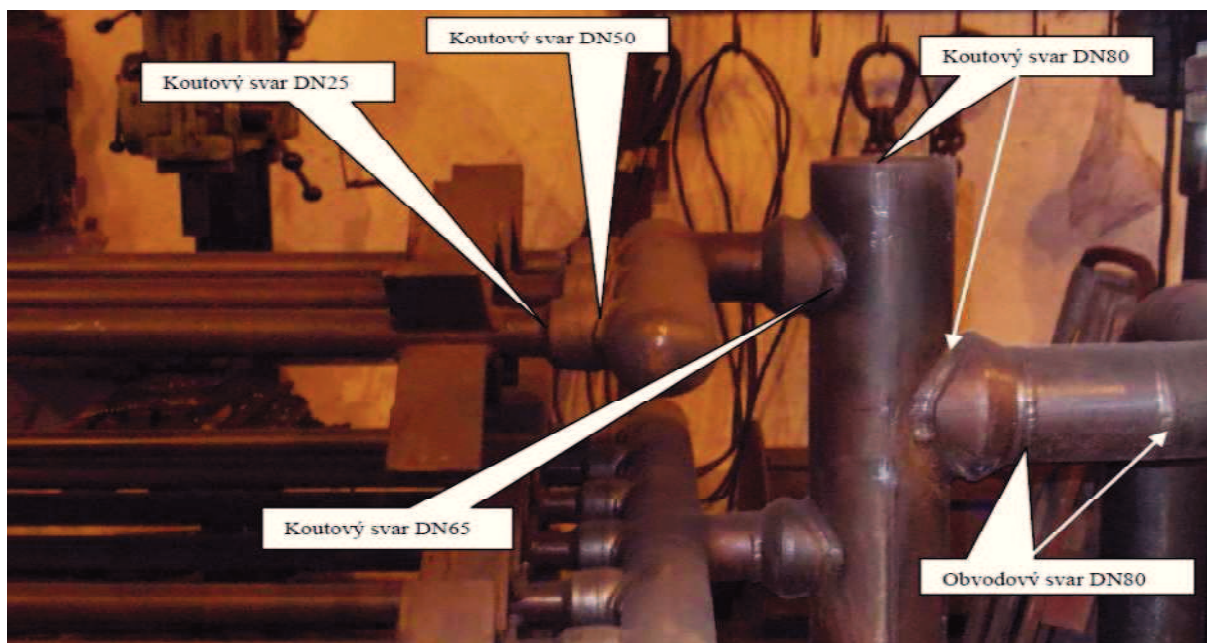
Tabulka 3 – Výsledek PT provzdušňovacího potrubí, označení svarů. Viz obr. č. 16 - 18



Obr. 15 – Označení svarů při PT provzdušňovacího potrubí výsledek. Viz tab. č. 3



Obr. 16 - Označení svarů při PT provzdušňovacího potrubí výsledek. Viz tab. č. 3



Obr. 17 - Označení svarů při PT provzdušňovacího potrubí výsledek. Viz tab. č . 3

3.5 Ultrazvuková zkouška

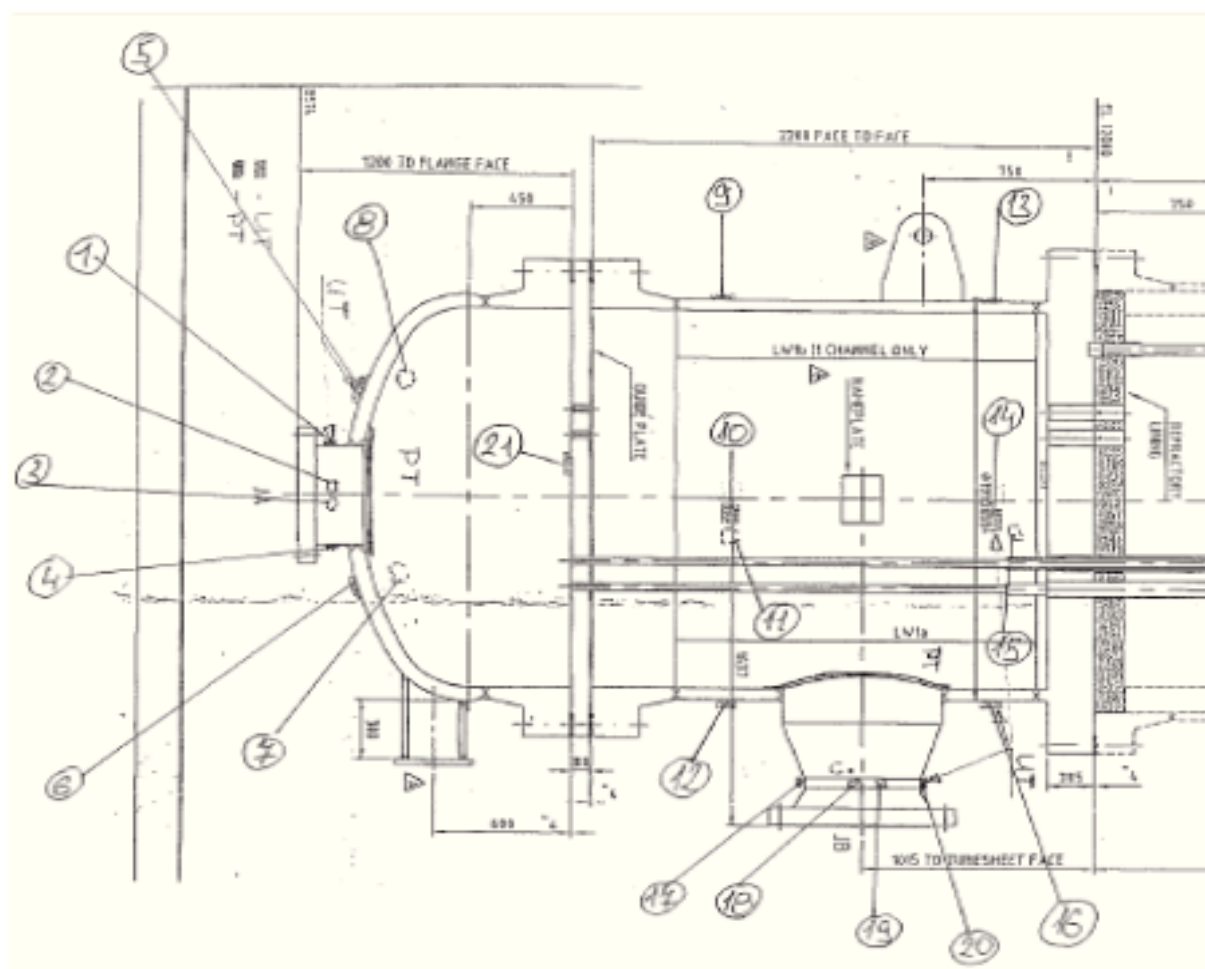
Kontrola síly stěny komory, víka a hrdel aparátu.

- Druh zkoušky : ultrazvuková
- Metoda : odrazová
- Měřicí přístroj : digitální tloušťkoměr DM4 DL
- Měřicí měnič : DA 301
- Přesnost měření : $\pm 5\%$ z naměřených hodnot

Výsledek měření. Viz tabulka č. 4 a obrázek č. 19

Měřicí místo	Naměřená hodnota	Měřicí místo	Naměřená hodnota	Měřicí místo	Naměřená hodnota
1	45,4 mm	8	68,0 mm	15	55,5 mm
2	45,5 mm	9	55,5 mm	16	55,5 mm
3	45,4 mm	10	55,3 mm	17	55,4 mm
4	45,3 mm	11	55,3 mm	18	55,5 mm
5	67,9 mm	12	55,3 mm	19	55,4 mm
6	67,9 mm	13	55,4 mm	20	55,4 mm
7	68,0 mm	14	55,4 mm	21	79,2 mm

Tabulka 4 – Výsledek měření síly stěny pomocí ultrazvuku.



Obr. 18 – Kontrolní body měření síly materiálu pomocí ultrazvuku.

Kontrola síly stěny komory, víka a hrdel aparátu byly porovnány s materiálovými atesty.

Výsledek: Komora, víko ani hrdla aparátu nejsou plošně zeslabena a odpovídají síle stěny uvedené v materiálové rozpisce a pevnostním výpočtu aparátu.

3.6 Rentgenová zkouška

10% kontrola RT na podélném svaru komory.

- Druh zkoušky : Rentgenová
- Zdroj : Gammamat Ti-F Iridium 192
- Expoziční čas : 2 hodiny
- Aktivita : 35,5 Ci
- Vzdálenost : 1 m.

Zdroj záření byl umístěný excentricky uvnitř objektu a filmem na vnější straně. Viz obr. č. 20. Kontrola rentgenem byla upřednostněna před ultrazvukovou zkouškou šikmou sondou z důvodu, že chladič katalyzátoru je vyroben podle ASME a tato norma upřednostňuje rentgen před ultrazvukem (dokumentovatelný výsledek zkoušky). Byly provedeny tři snímky o délce 480 mm, z toho bylo hodnoceno 450 mm kůly ořezání. Kontrolovaný svar vyhovuje zařazení do stupně přípustnosti 1, třída jakosti B.

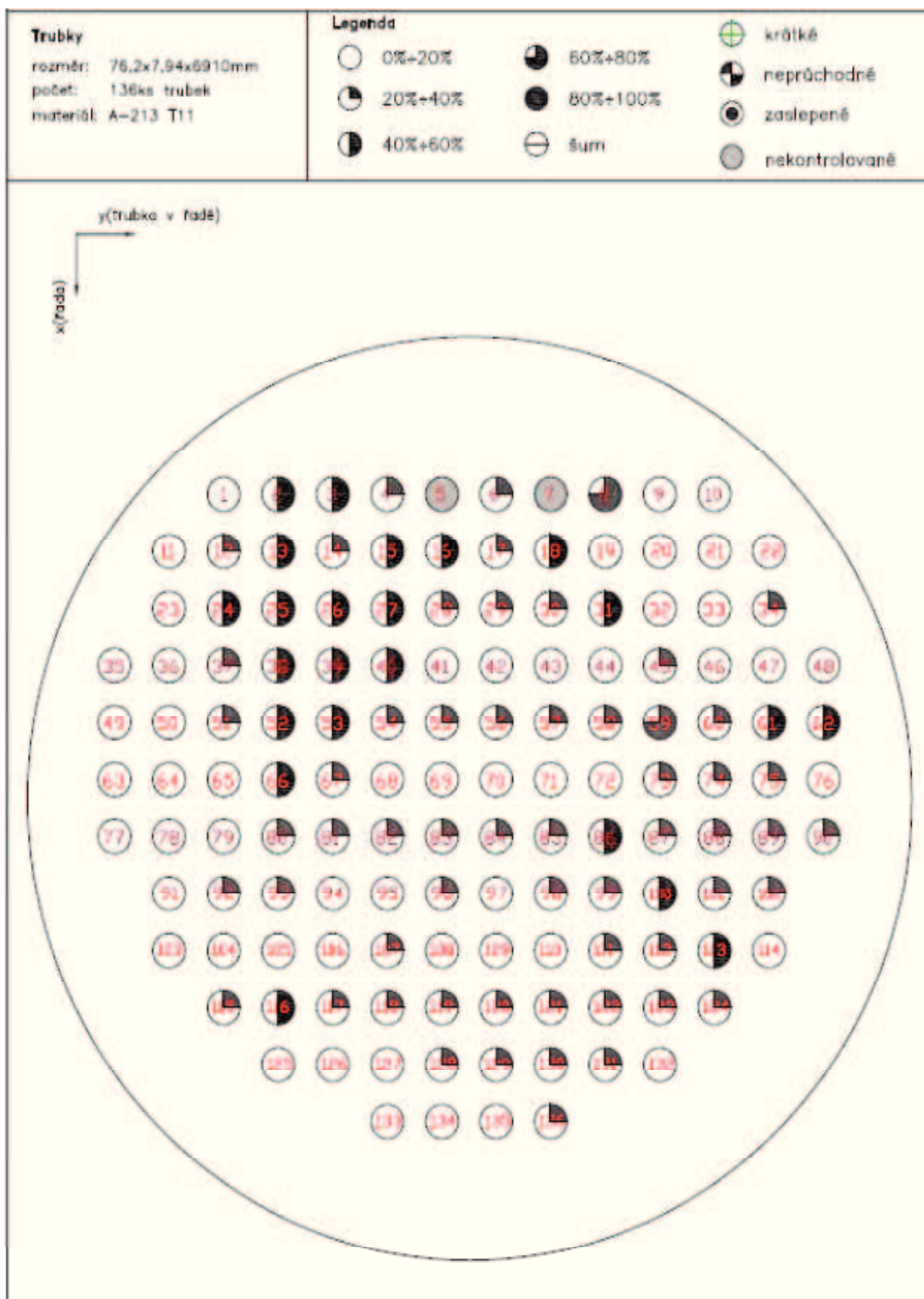


Obr. 19 - Rentgen podélného svaru komory chladiče kondenzátu.

3.7 Nedestruktivní kontrola teplosměnných trubek.

Byla provedena ultrazvuková kontrola trubek metodou IRIS u 134 kusů trubek o vnějším průměru 76,2 mm vyjmutých z používaného svazku chladiče kondenzátoru. Trubky s čísly 5 a 7 nemohly být zkontrolovány, protože byly použity na výrobu standardů a na další analýzy. Samostatná kontrola proběhla na volně ložených trubkách zbavených zátek. Trubky byly pro účely měření označeny pořadovými čísly 1-136. Jejich rozložení ve svazku je zřejmé viz obr. č. 21

Kontrola byla zaměřená na zjištění stavu trubek (rozsahu poškození) po vyřazení svazku z provozu. Trubky byly měřeny směrem od trubkovnice i od zátky směrem k trubkovnici v závislosti na umístění trubky. Směr měření je udán v tabulce hodnocení záznamů, která je přílohou této práce. Příloha č. 1



Obr. 20 – Rozložení trubek ve svazku chladiče kondenzátoru.

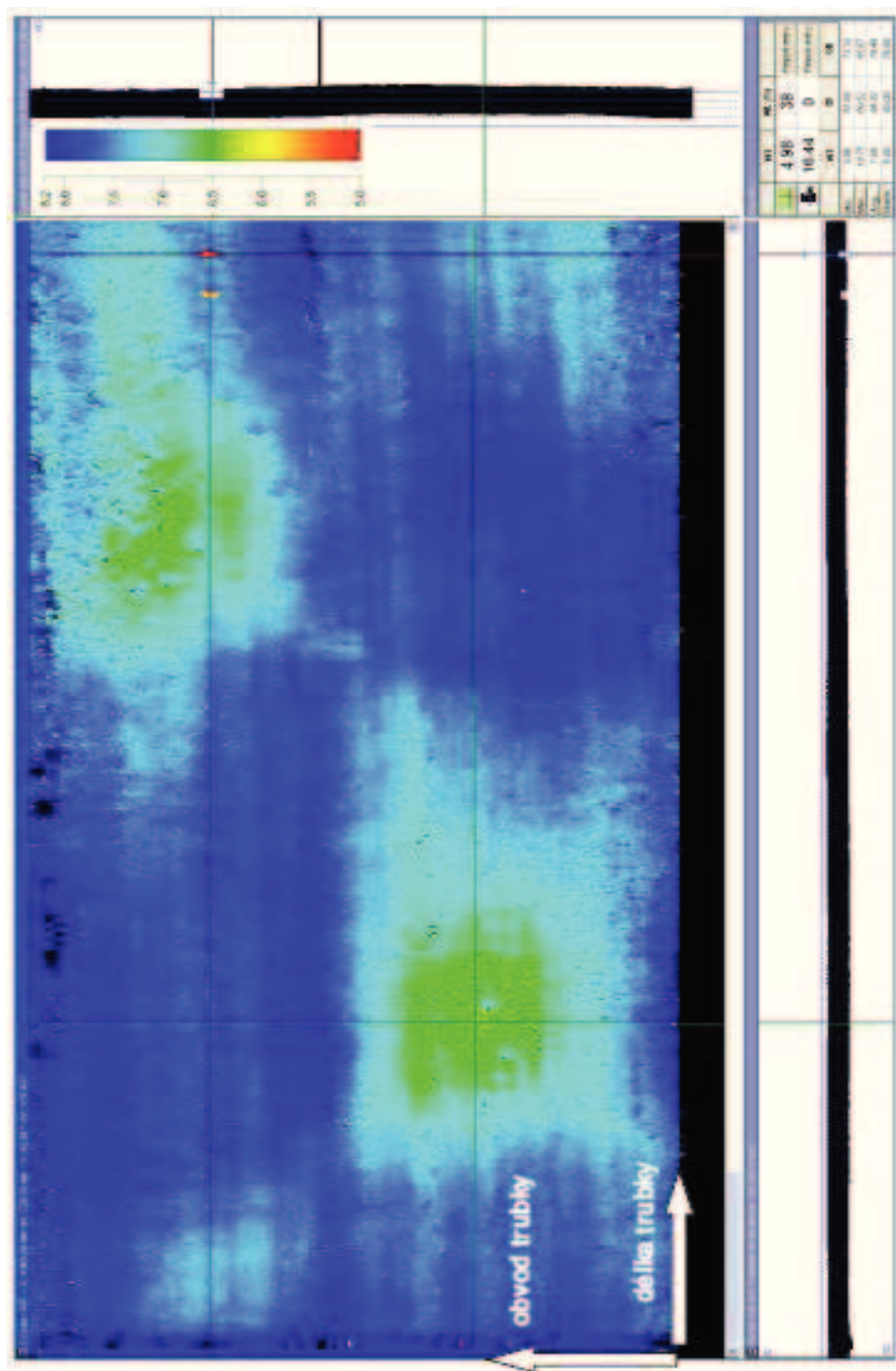
Přestože byly trubky chemicky vyčištěny a před samotným měřením propláchnuty tlakovou vodou, byla na některých záznamech patrna vynechaná místa, což bylo způsobeno odlupujícími se usazeninami, či korozními produkty, které se volně pohybovaly kolem sondy. Posledních 300-400 mm trubky nebylo technicky možné změřit vzhledem k délce centrovaného zařízení. Na naměřených záznamech byla nalezena místa s indikacemi lokálního i plošného poškození zejména povrchu trubek. Minimální naměřené tloušťky, charakter a přibližná poloha vad jsou zaneseny v tabulce, která je přílohou této práce. Příloha č. 1

Po analýze naměřených záznamů byly kontrolované trubky svazku zařazeny do jednotlivých kategorií podle tabulky č. 5

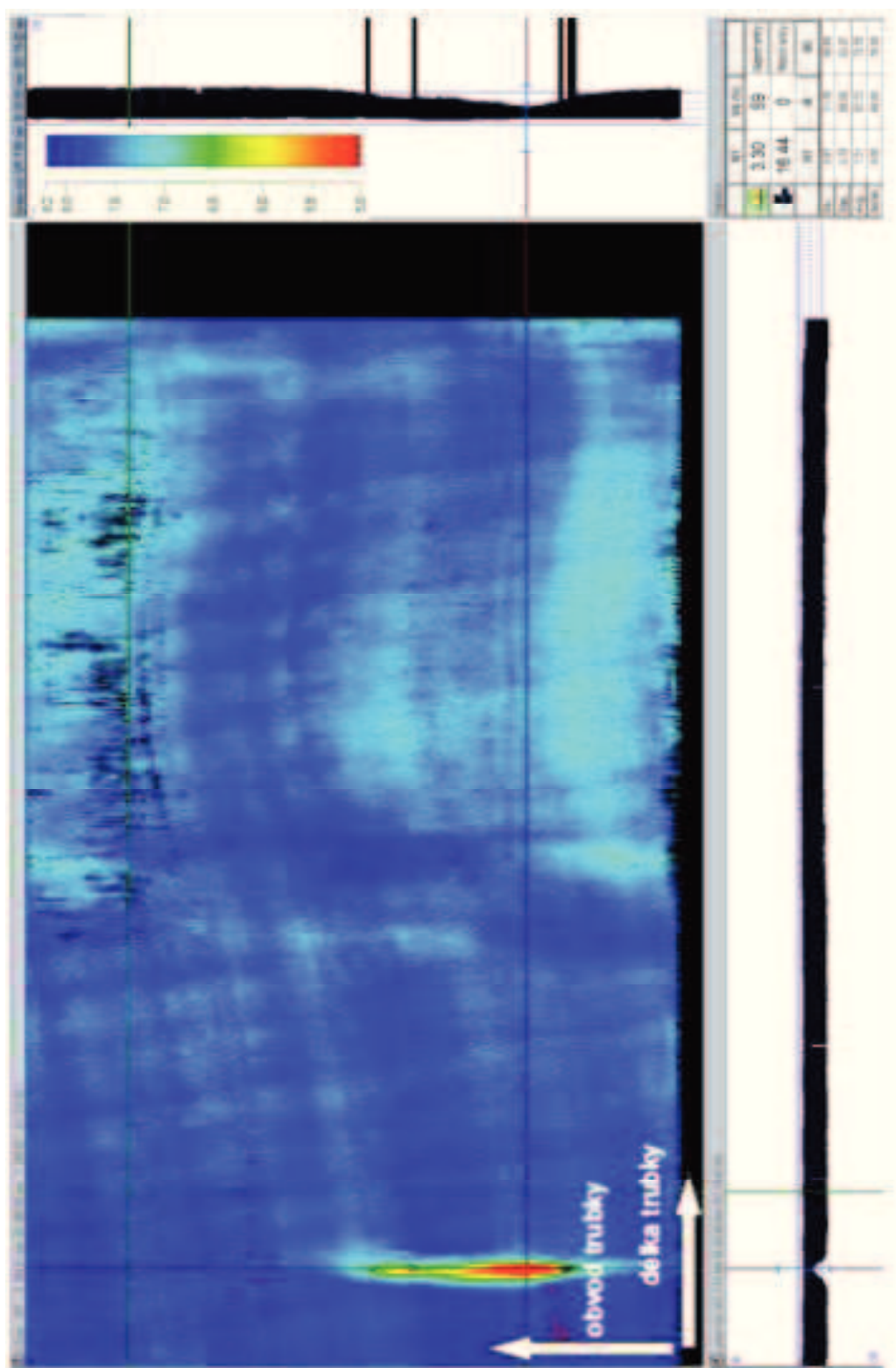
Výměník	do 20%	20 – 40%	40 – 60%	60 - 80%	80 – 100%	neprůchodné	Celkem
Ks	53	56	23	2	0	0	134
%	39,5	41,8	17,2	1,5	0	0	100

Tabulka 5 – Kategorie trubek podle procentuálního zeslabení. Rozložení trubek viz obr. č. 21

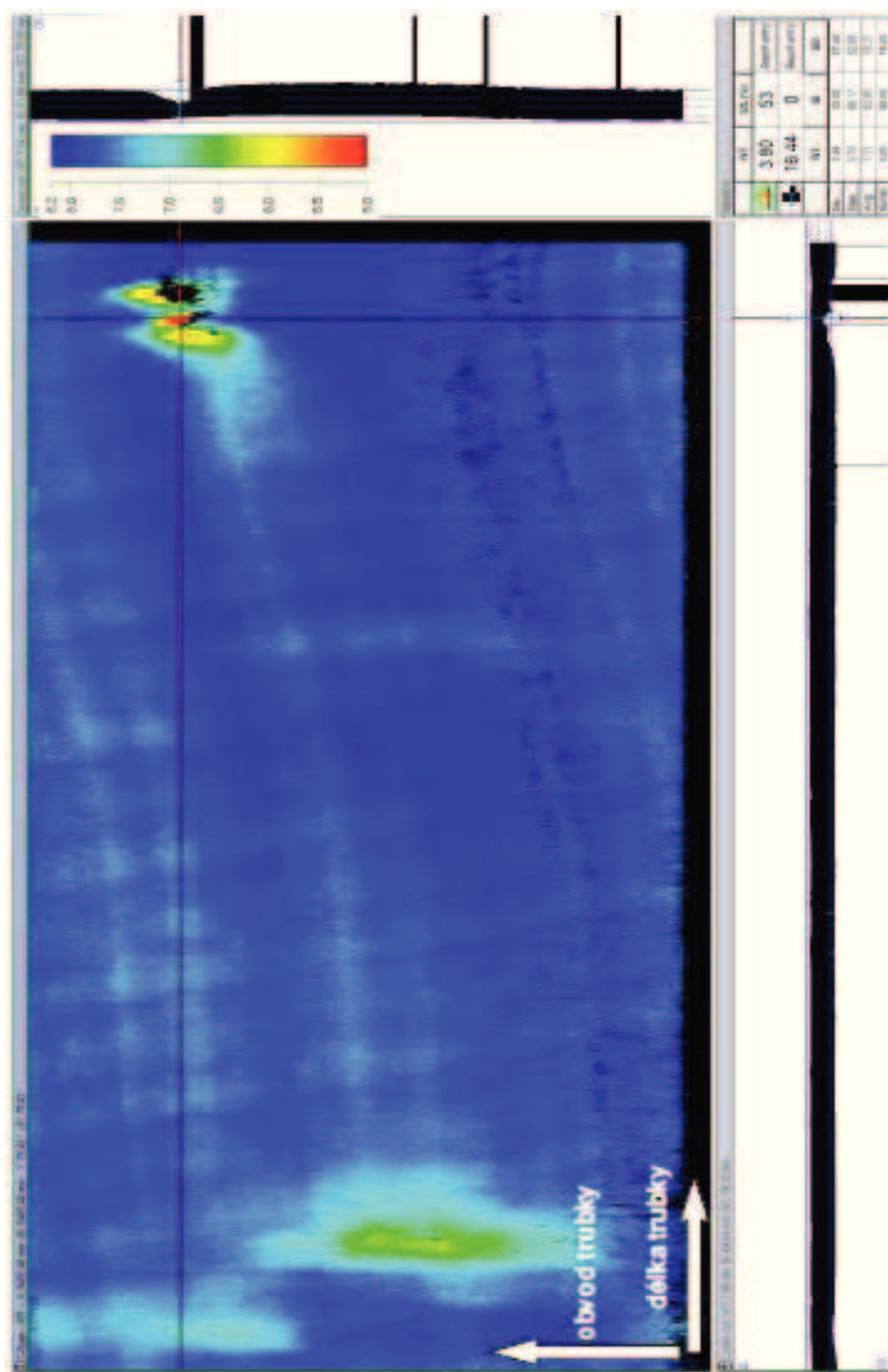
Na obrázcích 22 - 26 je příklad záznamů (rozvinuté stěny trubky), které jsou ihned viditelné na monitoru. Je to jedna z výhod používání metody IRIS. Na těchto obrázcích jsou možno pozorovat černá místa a červené (čárky), z největší pravděpodobností to jsou vadná echa, tato echa mohou vznikat přítomností vzduchu ve vodě, která zajišťuje vazebné prostředí. Poškození povrchu trubek viditelná na záznamech z největší pravděpodobností způsobili zničené kopí provzdušňovacího potrubí (viz obr. 15), proudící médium unikalo prasklinou v kopí kolmo na trubku. Toto proudění s kombinací vysoké teploty způsobilo degradaci materiálu s plošným i bodovým zeslabením.



Obr. 21 - Příklad naměřeného záznamu kalibrační trubky o tloušťce stěny cca 8 mm. V trubce jsou vyhotoveny dva vývrty s plochým dnem o průměru 5 mm do hloubky 2,5 mm a 3,0 mm (v místě křížení červených kurzorů). Jelikož jako kalibrační trubka byla použita trubka z provozovaného svazku, lze na záznamu pozorovat rovněž oblasti s plošným úbytkem, jehož maximální intenzita na úrovni 20% z nominální tloušťky se nachází přibližně v místě křížení zelených kurzorů. Nejmenší zbytková tloušťka stěny v těchto místech činí cca 6,5 mm.

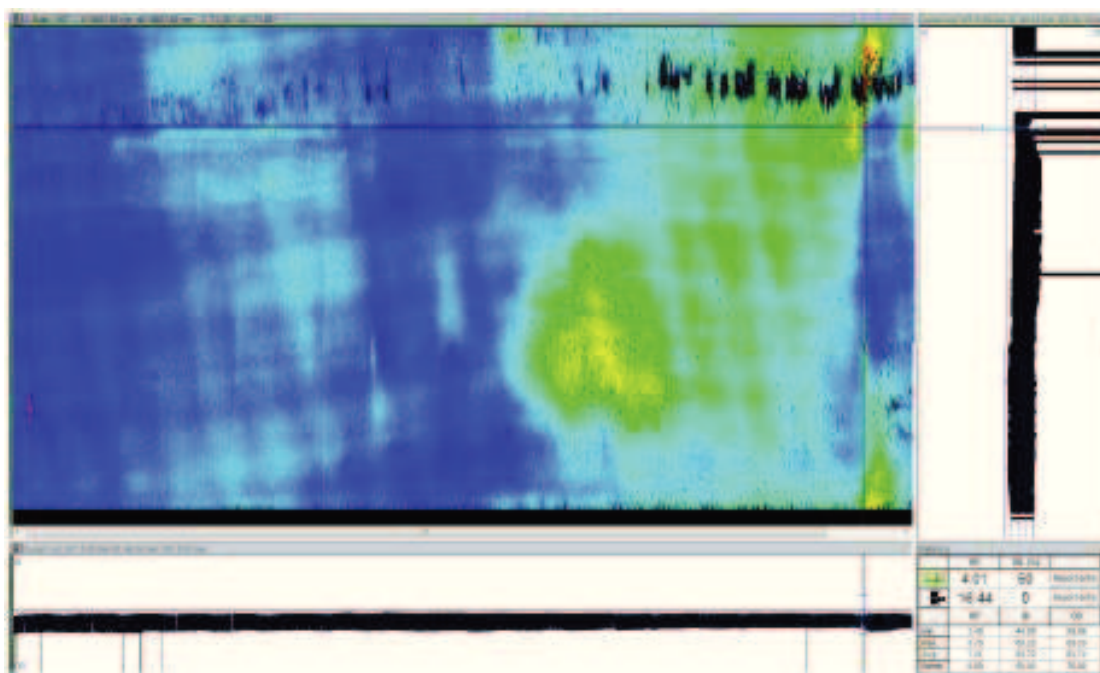


Obr. 23 - Příklad naměřeného záznamu trubky č. 86 s patrnou indikací úbytku tloušťky stěny lokálního charakteru. Nejmenší naměřená tloušťka stěny trubky 3,3 mm byla naměřena v místě křížení vodorovného a svislého kurzoru. Trubka byla měřena směrem od trubkovnice k zátce.



Obr. 25 - Příklad naměřeného záznamu trubky č. 62 s patrnými indikacemi úbytku tloušťky stěny jak lokálního, tak plošného charakteru. Nejmenší naměřená tloušťka stěny trubky 3,8 mm byla naměřena v místě křížení vodorovného a svislého kurzoru. Trubka byla měřena směrem od zátky k trubkovnici.

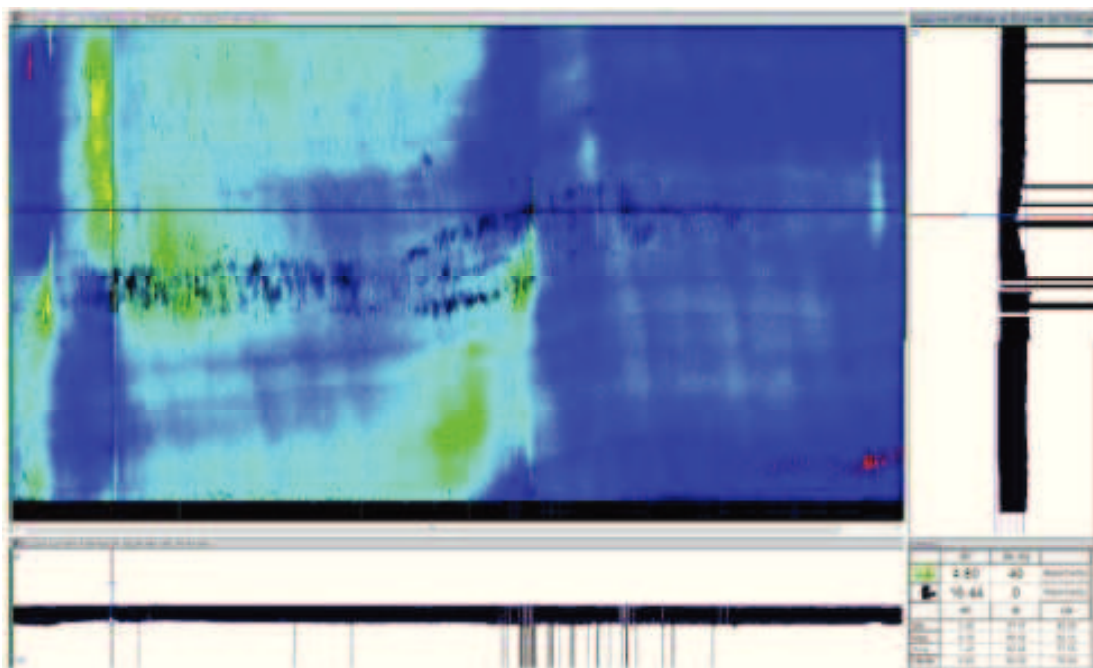
Na dvojicích obrázků 27 - 36 viz níže je názorně vidět lokální, nebo plošné povrchové zeslabení. První obrázek je vždy záznam pomocí metody IRIS a druhý je fotografie povrchu trubky, viditelný při vizuální kontrole povrchu.



Obr. 26 - Záznam trubky č. 15 s vyznačeným místem s největším úbytkem tloušťky stěny (přibližně 50%).



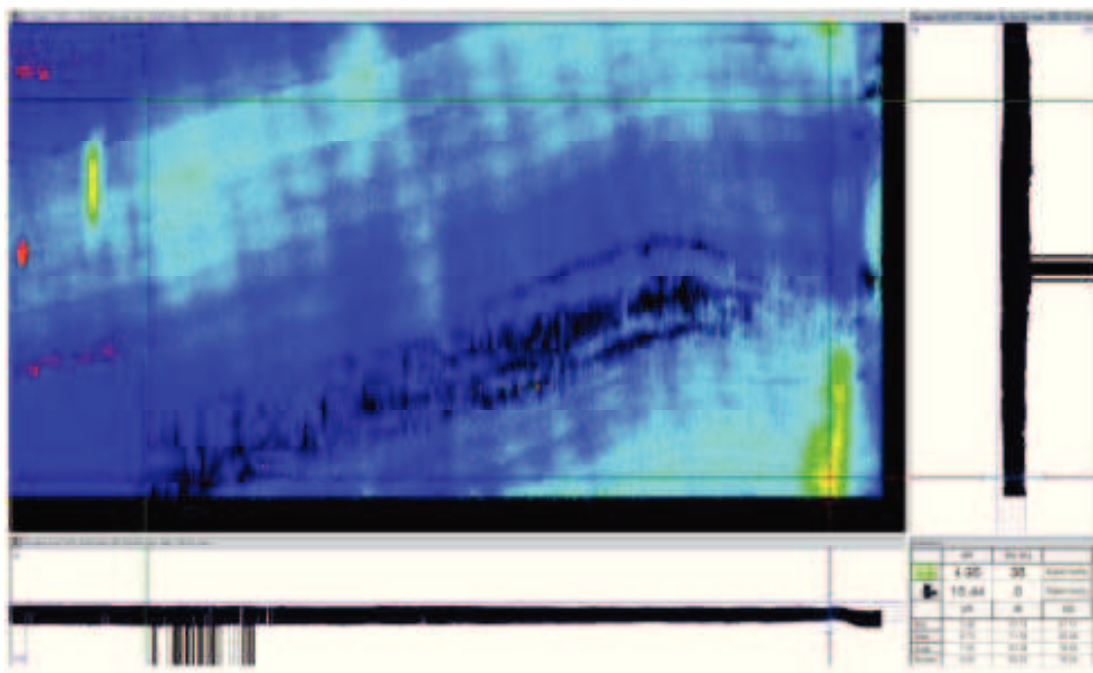
Obr. 27 - Foto místa s viditelným plošným zeslabením tloušťky stěny trubky č. 15 pro porovnání se záznamem na obrázku č. 27.



Obr. 28 - Záznam trubky č. 39 s vyznačeným místem s největším úbytkem tloušťky stěny (přibližně 40%).



Obr. 29 - Foto místa s viditelným lokálním zeslabením tloušťky stěny trubky č. 39 pro porovnání se záznamem na obrázku č. 29.



Obr. 34 - Záznam trubky č. 80 s vyznačeným místem s největším úbytkem tloušťky stěny (přibližně 38%).



Obr. 35 - Foto místa s viditelným plošným zeslabením tloušťky stěny trubky č. 80 pro porovnání se záznamem na obrázku č. 35.

4. Závěr

Cílem této práce bylo popsání metod NDT při kontrole svarových spojů a vyzkoušení těchto metod v praxi na chladiči kondenzátoru, který poskytuje velmi důležitou provozní flexibilitu FCC, umožňující přímou regulaci teploty regenerovaného katalyzátoru.

Výsledky provedených zkoušek by se daly shrnout do těchto bodů:

- Komora chladiče kondenzátoru, víko, hrdla, prověřené nedestruktivními kontrolami (TZ, VT, PT, UT, RT) nejsou plošně ani bodově zeslabeny, nevykazují známky korozního napadení.
- Teplosměnné trubky: materiál SA 213 T11/SA450, na nich byla nedestruktivními metodami (VT, IRIS) zjištěna plošná i bodová zeslabení po celém povrchu. Je možno říci, že toto poškození s největší pravděpodobností způsobilo zničené kopí provzdušňovacího potrubí, jelikož proudící médium unikalo prasklinou v kopí kolmo na trubku. Tyto degradace povrchu trubek lze pozorovat na záznamech UT pořízených metodou IRIS v porovnání s fotodokumentací povrchu trubek.
- Provzdušňovací potrubí: materiál SA-312 TP 304H, bylo zjištěno velké bodové zeslabení u trubek na konci kopí. Na některých bylo možno pozorovat praskliny i díry. Je možno uvažovat, že toto zeslabení konců kopí bylo způsobeno kavitací v důsledku proudícího media.

Po celkové diagnostice chladiče kondenzátoru bylo zjištěno, že aparát by další min. desetiletý cyklus bez opravy nevydržel z důvodu korozního a erozního napadení trubek. Nedala by se zajistit těsnost aparátu a průniku páry do prostoru katalyzátoru. Tím by byla ohrožena provozní flexibilita FCC.

Proto bylo rozhodnuto, že komora chladiče, víko, hrdla budou zachovány a použity pro výrobu nového chladiče kondenzátoru. Teplosměnné trubky a trubkovnice budou vyřezány a vyměněny za nové. Provzdušňovací potrubí se na koncích zaříznou o 300 mm, vyrobí se a následně navaří nová. Při výrobě budou provedeny další nedestruktivní kontroly, které zaručí bezpečnost výrobku. Tyto kontroly už nejsou předmětem této bakalářské práce.

Investice do včasné opravy se v tomto případě díky dlouhodobému bezporuchovému chodu aparátu vyplatí, jelikož odstavení jednotky FCC by bylo mnohonásobně nákladnější. Je možno konstatovat, že volba materiálu pro vysoce exponované prostředí, ve kterém chladič kondenzátoru pracuje a zároveň požadovanou dlouhou životnost, se ukázala jako vhodná.

Literatura

- [1] DIRECTIVE 97/23/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 MAY 1997 on the approximation of the laws of the Member States concerning pressure equipment.
- [2] EN ISO 15614-1 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel alloys. 2004 ICS 25.160.10
- [3] ČSN EN ISO 9016 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení. 2013 ICS 25.160.40 - Svarové spoje.
- [4] Kolařík, L. Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů. České vysoké učení technické v Praze.
- [5] Legát, V. a kol. Management a inženýrství údržby. PBtisk Příbram 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [6] ATG. www.atg.cz [Online] [Citace: 8. 1 2014.] <http://www.atg.cz/ndt-161&display=VT>
- [7] APC, Pitter. Zkoušení vizuální metodou (VT) Stupeň 2. 30.07.2006, Plzeň : Copyright by QC Plzeň s.r.o., 2006.
- [8] Kopec, B. a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [9] Míšek, B., Ptáček, L. Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1973. ISBN 04-230-74.
- [10] Kreidl, M. a kol. Diagnostické systémy. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02349-4.
- [11] ČSN EN 1435. Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení svarových spojů. 1999. ICS 25.160.40.
- [12] ČSN EN 12517 - 1. Nedestruktivní zkoušení svarů - Část 1: Hodnocení svarových spojů u oceli, niklu, titanu a jejich slitin při radiografickém zkoušení - Stupně přípustnosti. 2006. ICS 25.160.40 svarové spoje.

- [13] Kreidl, M., Šmíd, R., Matz, V., Štarman, S. Ultrazvuková Defektoskopie. Praha : Starmans Electronics s.r.o. 2011. ISBN 978-80-254-6606-3.
- [14] Regazzo, R., Regazzová, M. Ultrazvuk - Základy ultrazvukové defektoskopie. Praha : Technická literatura BEN. 2013. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [15] Svoboda, V. Využití Akustické emise při zkouškách TZ. Praha : ATZ Medim spol, s.r.o. 2011. ISBN 978-80-87140-19-2.
- [16] ATG. www.atg.cz [Online] [Citace: 11. 1 2014.] <http://www.atg.cz/ndt-151&display=ET>
- [17] ATG. www.atg.cz [Online] [Citace: 14. 1 2014.] <http://www.atg.cz/ndt-171&display=LT>
- [18] Kováčík, M., Kučík, P. Ultrazvuková kontrola při určování hloubkových rozměrů vad. Slovensko : Slovcert s.r.o., Bratislava.
- [19] Porkert, Z., Speier, P. Phased Array Zásadní změna v ultrazvukové kontrole. Testima Spol s.r.o., AGFA NDT Krautkramer Ultrasonic Systems.
- [20] Kováčík, P. Technika Phased array při zkoušení svaru. NDT Trade s.r.o.
- [21] Procházka, M. Výhody ultrazvukových metod při interpelaci výsledků. Chomutov : Medim spol s.r.o, 2013. ISBN 978-80-87140-32-1.
- [22] Olympus. IRIS Inspection Technique Teory and General Concept.
- [23] <http://www.investicniweb.cz/zpravy-z-trhu/2013/5/29/ceska-rafinerska-neplanovane-odstavila-rafinerii-v-kralupech-nv/>. [Online]

Seznam zkratek:

- NDT : Nedestruktivní zkoušení (Non- Destructive testing)
- TOO : Tepelně ovlivněná oblast
- VT : Vizuální metoda (Visual testing)
- PT : Kapilární metoda (Penetrant testing)
- MT : Magnetická metoda prášková (Magnetic particle testing)
- UT : Ultrazvuková metoda (Ultrasonic testing)
- RT : Metoda prozařování (Radiographic testing)
- LT : Zkoušení těsnosti (Leakage testing)
- ET : Zkoušení vířivými proudy (Eddy current testing)
- AT : Zkoušení akustickou emisí (Acoustic emission testing)
- IRIS : Internal rotary inspection systems
- FCC : Jednotka fluidního katalytického krakování (FCC je klíčovou jednotkou kralupské rafinérie, umožňuje převádění těžkých produktů do lehkých rafinérských produktů s vyšší hodnotou [23])

Příloha 1 - Výsledky měření metodou IRIS

2411-E01 - použité trubky				
Měřeno od:	Trubka č.	Min. tloušťka	Úbytek v %	Pozn.
Zátka	1	6,60	18,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	2	3,80	53,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	3	4,65	42,0	lokální (1/3 u tr) + plošné (1/2 zát)
Zátka	4	4,89	39,0	lokální (1/3 u tr) + plošné (1/2 zát)
-	5	-	-	Použito na zkušební vzorky a analýzy
Zátka	6	5,07	37,0	plošné (1/2 zát)
-	7	-	-	Použito na zkušební vzorky a analýzy
Zátka	8	3,15	61,0	lokální (1/3 u tr) + plošné (1/2 zát)
Zátka	9	6,83	15,0	celá trubka
Zátka	10	6,60	18,0	celá trubka
Zátka	11	7,04	12,0	celá trubka
Zátka	12	6,42	20,0	lokální + plošné
Zátka	13	4,68	41,0	lokální + plošné (1/2 zát)
Zátka	14	5,07	37,0	lokální + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	15	4,42	45,0	lokální (1/4 u zát) + plošné (1/2 u zát)
Trubkovnice	16	4,71	41,0	lokální (1/3 zát) + plošné (1/2 zát)
Zátka	17	5,80	27,0	lokální + plošné (1/2 zát)
Zátka	18	4,77	40,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	19	6,74	16,0	plošné (1/2 tr)
Zátka	20	6,89	14,0	plošné (trubka)
Trubkovnice	21	7,39	8,0	plošné (trubka)
Trubkovnice	22	7,33	8,0	plošné (trubka)
Trubkovnice	23	7,07	12,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	24	4,12	48,0	lokální (1/3 tr) + lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	25	3,71	54,0	lokální + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	26	3,56	55,0	lokální + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	27	4,30	46,0	lokální + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	28	5,18	35,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	29	6,16	23,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/2 zát)
Zátka	30	6,27	22,0	lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	31	4,54	43,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	32	6,57	18,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	33	7,19	10,0	celá trubka
Trubkovnice	34	5,33	33,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	35	7,48	6,0	celá trubka
Zátka	36	7,69	4,0	celá trubka
Trubkovnice	37	5,42	32,0	plošné (1/2 tr)
Zátka	38	3,53	56,0	lokální (1/3 zát) + plošné (1/2 zát)
Zátka	39	4,83	40,0	lokální (1/3 zát) + plošné (1/2 zát)
Zátka	40	4,48	44,0	lokální (1/3 zát) + plošné (1/2 zát)

Zátka	41	6,48	19,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	42	6,71	16,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	43	7,13	11,0	celá trubka
Zátka	44	6,80	15,0	celá trubka
Zátka	45	6,10	24,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	46	6,66	17,0	plošné (1/2 zát)
Zátka	47	6,57	18,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	48	6,60	18,0	lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	49	7,54	6,0	celá trubka
Zátka	50	7,57	5,0	celá trubka
Zátka	51	5,86	27,0	plošné (1/2 zát)
Zátka	52	3,65	54,0	plošné + lokální (1/2 zát)
Zátka	53	3,62	55,0	plošné + lokální (1/2 zát)
Zátka	54	5,09	36,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	55	5,04	37,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	56	6,04	25,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	57	5,51	31,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	58	6,16	23,0	lokální (1/3 tr) + plošné trubka
Zátka	59	2,97	63,0	lokální (1/3 tr) + plošné trubka
Zátka	60	6,39	20,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	61	4,56	43,0	lokální (1/3 tr)
Zátka	62	3,80	53,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/3 zát)
Zátka	63	7,51	6,0	celá trubka
Zátka	64	7,63	5,0	celá trubka
Zátka	65	6,71	16,0	uprostřed plošné
Zátka	66	4,42	45,0	lokální + plošné (1/2 zát) + lokální (1/3 tr)
Zátka	67	5,77	28,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	68	6,71	16,0	plošné (1/2 tr)
Zátka	69	6,89	14,0	celá trubka
Trubkovnice	70	6,98	13,0	celá trubka
Zátka	71	7,22	10,0	celá trubka
Zátka	72	7,13	11,0	celá trubka
Trubkovnice	73	6,42	20,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	74	6,16	23,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	75	5,60	30,0	plošné (1/3 zát)
Trubkovnice	76	6,45	19,0	lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	77	7,39	8,0	celá trubka
Trubkovnice	78	7,51	6,0	celá trubka
Trubkovnice	79	7,07	12,0	plošná (1/3 tr)
Trubkovnice	80	5,12	36,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	81	5,33	33,0	lokální (1/3 zát) + lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	82	4,92	39,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	83	5,89	26,0	lokální (1/3 tr)

Trubkovnice	84	5,71	29,0	lokální (1/3 zát)
Zátka	85	6,39	20,0	lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	86	3,30	59,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	87	6,07	24,0	plošné (1/3 zát)
Trubkovnice	88	5,27	34,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/3 zát)
Trubkovnice	89	5,42	32,0	plošné (1/3 zát)
Trubkovnice	90	6,36	20,0	plošné (1/3 zát)
Trubkovnice	91	7,57	5,0	celá trubka
Trubkovnice	92	5,80	27,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	93	5,62	30,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	94	6,45	19,0	celá trubka
Trubkovnice	95	7,04	12,0	celá trubka
Trubkovnice	96	6,36	20,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	97	6,80	15,0	celá trubka
Trubkovnice	98	6,21	22,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	99	5,80	27,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	100	4,42	45,0	lokální (1/3 tr) + lokální + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	101	6,42	20,0	plošné i lokální po celé trubce
Trubkovnice	102	5,57	30,0	lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	103	7,63	5,0	celá trubka
Trubkovnice	104	7,75	3,0	celá trubka
Trubkovnice	105	6,54	18,0	plošné (1/2 tr)
Trubkovnice	106	6,63	17,0	celá trubka
Trubkovnice	107	5,68	29,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	108	6,54	18,0	plošné (1/3 zát)
Trubkovnice	109	6,66	17,0	lokální (1/3 tr) + uprostřed plošné
Zátka	110	6,63	17,0	celá trubka
Trubkovnice	111	6,21	22,0	lokální uprostřed
Trubkovnice	112	6,24	22,0	lokální uprostřed
Trubkovnice	113	3,42	57,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	114	6,95	13,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	115	5,30	34,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	116	4,45	44,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	117	6,33	21,0	lokální (1/3 tr)
Trubkovnice	118	6,36	20,0	lokální po trubce
Trubkovnice	119	6,30	21,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	120	6,07	24,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	121	6,13	23,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	122	6,04	25,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	123	6,18	23,0	lokální (1/3 tr) + plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	124	6,36	20,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	125	7,01	12,0	celá trubka
Trubkovnice	126	7,16	11,0	celá trubka

Trubkovnice	127	6,45	19,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	128	6,33	21,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	129	5,86	27,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	130	5,89	26,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	131	5,60	30,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	132	6,45	19,0	plošné (1/2 zát)
Trubkovnice	133	7,42	7,0	celá trubka
Trubkovnice	134	6,89	14,0	uprostřed plošné
Trubkovnice	135	6,71	16,0	lokální (1/3 zát)
Trubkovnice	136	6,27	22,0	lokální (1/2 zát)

Legenda:	
1/2 zát:	Indikace se nachází v oblasti mezi zátkou a přibližně polovinou trubky
1/3 tr:	Indikace se nachází v oblasti mezi trubkovnicí a přibližně třetinou trubky (od trubkovnice)
Celá trubka:	Indikace úbytků přibližně rovnoměrně po celé trubce
Uprostřed:	Indikace úbytků přibližně v polovině trubky